

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

В. М. Коваль

ОПТОЕЛЕКТРОНІКА ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра,
які навчаються за освітньою програмою «Мікро- та наноелектроніка»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2019

Рецензенти: Тимофєєв В. І., д.т.н., проф.

Відповідальний

редактор Борисов О. В., к.т.н., проф.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім.Ігоря Сікорського(протокол №9 від 30.05.2019 р.)
за поданням Вченої ради факультету електроніки (протокол №04/2019 від 26.04.2019 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

Коваль Вікторія Михайлівна, канд. техн. наук, доц.

ОПТОЕЛЕКТРОНІКА

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Оптоелектроніка: Лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра, які навчаються за освітньою програмою «Мікро- та наноелектроніка»/ В.М. Коваль; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,84 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 70 с.

Метою лабораторного практикуму є ознайомлення студентів на практиці з принципом дії оптоелектронних приладів і засвоєння методики вимірювання їх основних характеристик. Студентам пропонується виконати 5 лабораторних робіт по фотоприймачам, фотоелектричним перетворювачам, світлодіодам, фотоварікапам та оптично-активним тонким плівкам. До кожної лабораторної роботи в посібнику містяться короткі теоретичні відомості, опис лабораторного стенду, порядок виконання роботи, рекомендації щодо обробки результатів вимірювання та контрольні запитання.

© В.М. Коваль, 2019

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	4
ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ЩОДО ВИКОНАННЯ, ОФОРМЛЕННЯ ТА ЗАХИСТУ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ.....	6
Лабораторна робота №1 ”Дослідження характеристик фотоприймачів”	7
Лабораторна робота №2 ”Дослідження характеристик фотоелектричних перетворювачів”.....	18
Лабораторна робота №3 ”Дослідження характеристик світлодіодів”	29
Лабораторна робота №4 ”Дослідження характеристик фотоварікапів”	42
Лабораторна робота №5 ”Дослідження оптичних характеристик тонких плівок”.....	59
ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ.....	68

ПЕРЕДМОВА

В останні десятиріччя оптоелектроніка як наука набула бурхливого розвитку, а елементи та прилади оптоелектроніки застосовуються практично в усіх галузях народного господарства від промисловості до побуту. Оптоелектроніка – це розділ електроніки, який вивчає електронно-оптичні принципи одержання, передавання, обробки і зберігання інформації, носієм якої є електрично нейтральний фотон. Через електричну нейтральність фотонів в оптичному каналі зв'язку не збуджуються електричні і магнітні поля, що супроводжують зазвичай протікання електричного струму. Іншими словами, фотони не створюють перехресних перешкод в лініях зв'язку і забезпечують повну електричну розв'язку між передавачем і приймачем, що принципово недосяжно в ланцюгах з електричним зв'язком. Передача інформації за допомогою світлового променя не супроводжується накопиченням і розсіюванням електромагнітної енергії в лінії. Звідси випливає відсутність істотного запізнювання сигналу в каналі зв'язку, висока швидкодія і мінімальний рівень спотворення інформації, що переноситься сигналом. Крім того, висока частота оптичних коливань (10^{14} — 10^{15} Гц) обумовлює великий об'єм інформації, що може передаватись, тобто забезпечується висока інформаційна ємність такого каналу.

Розвиток оптоелектроніки та оптичних засобів прийому, передачі та обробки зображень викликає необхідність створення систем оптичної обробки інформації, елементна база яких може виконувати із зображеннями функціональні перетворення в реальному масштабі часу.

До елементів та приладів оптоелектроніки відносяться: фотоприймачі для перетворення світлового сигналу в електричний (фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори, фототиристори), світлодіоди та лазери для перетворення електричного сигналу в світловий (джерела світла, індикатори), оптопари для

послідовного перетворення струм-світло-струм, фотоелектричні перетворювачі, призначені для перетворення енергії Сонця в електричну енергію (відновлювальні джерела енергії), оптоелектронні інтегральні схеми, в яких електричний зв'язок між окремими елементами схеми замінено на оптичний зв'язок. Спектр застосувань оптоелектронних елементів та приладів є досить широким: від фоточутливих сенсорів, індикаторів, світлодіодних та лазерних джерел світла до плоских екранів телевізорів, моніторів комп'ютерів та мобільних телефонів, напівпровідникових відеокамер, волоконно-оптичних ліній зв'язку, оптичних комп'ютерів та запам'ятовуючих пристроїв. Тому набуття теоретичних знань та практичних навичок роботи в області оптоелектроніки є необхідним для випускника будь-якої технічної спеціальності.

Метою лабораторних робіт з курсу "Оптоелектроніка" є ознайомлення на практиці з принципом дії ряду оптоелектронних елементів та приладів і засвоєння методики вимірювання їх основних характеристик. Студентам пропонується виконати 5 лабораторних робіт, які присвячені фотоприймачам, фотоелектричним перетворювачам, світлодіодам, фотоварікапам та оптично-активним тонким плівкам. В навчальному посібнику до кожної роботи наведено короткі теоретичні відомості, опис лабораторного стенду, порядок виконання роботи, обробка результатів вимірювання та контрольні запитання.

ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ЩОДО ВИКОНАННЯ, ОФОРМЛЕННЯ ТА ЗАХИСТУ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Перед початком виконання лабораторної роботи, студент зобов'язаний уважно ознайомитись з методичними вказівками щодо виконання даної роботи. Проводити вимірювання студенти можуть лише після одержання дозволу керівника лабораторних занять. Під час виконання експериментальної частини роботи потрібно дотримуватись наступних правил:

- зміни в схемі лабораторного стенду слід робити тільки після його відключення від джерела живлення;
- при виникненні несправності в приладах і устаткуванні негайно відключити джерело живлення і повідомити викладача;
- після закінчення роботи необхідно вимкнути вимірювальні прилади.

Під час лабораторної роботи студенти заносять отримані числові дані у таблиці. Наприкінці заняття результати лабораторної роботи потрібно надати викладачу на перевірку. Після затвердження викладачем лабораторна робота вважається виконаною.

На наступному лабораторному занятті студент надає викладачу оформлений звіт про виконання лабораторної роботи. Звіт повинен містити: короткий теоретичний опис роботи, блок-схему вимірювального стенду, хід виконання та результати лабораторної роботи (таблиці з результатами вимірювання, графічні залежності, розраховані коефіцієнти), а також висновки по роботі.

Підготовка до захисту лабораторної роботи включає в себе підготовку звіту та ознайомлення з теоретичними відомостями, які викладені в методичних вказівках, лекційному матеріалі та в списку рекомендованої літератури. Оцінювання роботи студентів на лабораторних заняттях здійснюється на основі Положення про рейтингову систему оцінювання з курсу "Оптоелектроніка".

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

Дослідження характеристик фотоприймачів

Мета роботи – ознайомитись з принципом дії та різновидами фотоприймачів, набути практичних навичок у вимірюванні основних характеристик та розрахунку основних параметрів фотоприймачів резистивного, діодного та транзисторного типу.

Теоретичні відомості

Фоторезистор – це напівпровідниковий резистор, принцип дії якого базується на зміні опору напівпровідника під дією світла. В основі роботи фоторезистора лежить явище поглинання оптичного випромінювання напівпровідником та фотопровідності. Фоторезистивний ефект спостерігається в напівпровідниках при енергії падаючого фотона, що є недостатньою для появи зовнішнього фотоефекта, однак достатньою для переходу носія з валентної зони в зону провідності. Такі фотони викликають появу внутрішнього фотоефекту, в результаті якого зростає кількість носіїв заряду у валентній зоні та зоні провідності. При цьому чим інтенсивнішим є опромінення, тим більшою є генерація фотоносіїв у ньому і тим більшим буде фотострум. Величина забороненої зони визначає “червону межу” чутливості фоторезисторів.

Найбільшого поширення набули фоторезистори на основі наступних матеріалів: CdS (робоча область спектру 0,3...0,9 мкм), CdSe (0,35...1,1 мкм), PbS (0,4...3,6 мкм), PbSe (0,54...4 мкм), InSb (2,2...9 мкм), Ge:Au (1,8...9 мкм). Конструктивно фоторезистор являє собою діелектричну підкладку з нанесеним на нього шаром напівпровідника з двома омічними контактами. Фоторезистори є досить чутливими приймачами оптичного випромінювання, однак

характеризуються низькою швидкодією. Схема включення, умовне позначення та основні характеристики фото резисторів наведені на рис.1. Основними характеристиками фотоприймачів резистивного типу є темнова та світлова вольт-амперна характеристика (ВАХ), а також люкс-амперна характеристика (ЛАХ) (рис.1). Основні параметри фото резисторів: відношення темнового опору до світлового, коефіцієнт фоточутливості, довжина хвилі максимуму фото чутливості, робоча напруга та частота. Зокрема коефіцієнт фоточутливості визначається за формулою:

$$K_{\phi} = \frac{I_{\phi 2} - I_{\phi 1}}{(\Phi_2 - \Phi_1) \cdot U} = \frac{I_{\phi 2} - I_{\phi 1}}{(E_2 - E_1) \cdot S \cdot U}, \quad (1)$$

де K_{ϕ} – коефіцієнт фоточутливості, А/лмВ; I_{ϕ} – фотострум; Φ – світловий потік; E – освітленість; S – площа зразку; U – напруга, при якій проводились вимірювання ЛАХ.

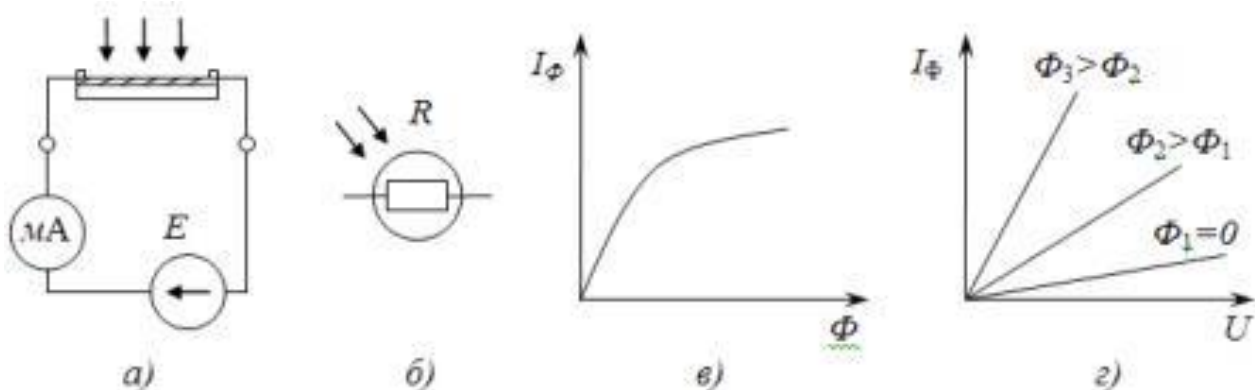


Рисунок 1 – Схема включення фоторезистора (а), умовне позначення (б), люкс-амперна (в) і вольт-амперна (г) характеристика фоторезистора

Фотодіод – це напівпровідниковий діод, принцип дії якого ґрунтується на зміні зворотнього струму через структуру при появі світла. При відсутності освітлення фотодіод представляє собою звичайний діод. При впливі випромінювання в напрямку, перпендикулярному площині р-п-переходу, в

результаті поглинання фотонів з енергією, більшою, ніж ширина забороненої зони, в n-області з'являються електронно-діркові пари. Ці електрони та дірки називаються фото носіями. Під час дифузії фотоносіїв вглиб n-області основна частина електронів та дірок не встигає проєкOMBінувати і доходить до межі p–n-переходу. Тут фото носії розділяються електричним полем p–n-перехода, при цьому дірки переходять в p-область, а електрони не можуть подолати поле переходу і накопичуються поблизу межі p–n-перехода. Таким чином, струм через p–n-перехід викликаний дрейфом неосновних носіїв – дірок. Дрейфовий струм фотоносіїв називають фотострумом, величина якого залежить від рівня освітленості.

Фотодіоди можуть працювати в одному з двох режимів – з зовнішнім джерелом живлення (фотодіодний режим) та без зовнішнього джерела живлення (фотогенераторний режим).

В фотодіодному режимі до фотодіоду прикладається зворотня напруга джерела живлення (рис.2, а), відповідно до чого робочою характеристикою є зворотня гілка ВАХ діоду (рис.2, б).

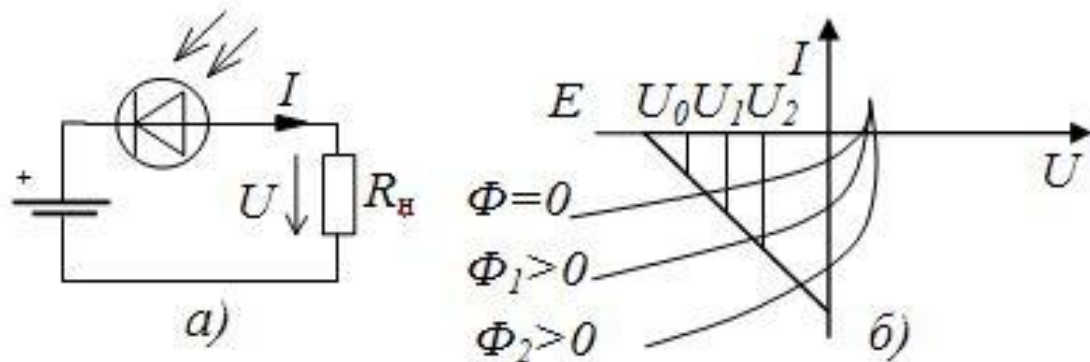


Рисунок 2 – Схема включення (а) та характеристики фотодіода (б)

Фотодіоди, що працюють в фотогенераторному режимі, називаються сонячними елементами, оскільки здатні перетворювати енергію Сонця в електричну енергію.

Основними матеріалами для фотодіодів є германій та кремній. Кремнієві фотодіоди зазвичай чутливі у вузькій області спектру (від $\lambda = 0,6 - 0,8$ мкм до $\lambda = 1,1$ мкм) з максимумом на $\lambda_{\max} = 0,85$ мкм, а германієві фотодіоди мають межі чутливості від 0,4 до 1,8 мкм з $\lambda_{\max} = 1,5$ мкм. За конструктивними ознаками фотодіоди бувають різних видів: р-п фотодіоди, р-і-п фотодіоди, лавинні фотодіоди, фотодіоди Шотткі, гетерофотодіоди. Довгохвильова межа чутливості фотодіодів обумовлена шириною забороненої зони напівпровідника, а короткохвильова – глибиною залягання р-п-переходу. Фотодіоди р-і-п-структури характеризуються підвищеною чутливістю та швидкодією порівняно з переходом без шару з власним типом провідності.

Фотоприймачі використовуються для виявлення оптичного випромінювання та вимірювання його основних характеристик. Область застосування фотоприймачів – сенсори освітленості для детектування світла, датчики для вимірювання величини освітленості поверхні або потужності оптичного випромінювання джерела світла.

Опис вимірювального стенду

Вимірювальний стенд складається з основного блоку з фотоприймачами, блоку живлення, блоку контролера світлодіодів, цифрових вольтметра-амперметра (для вимірювання струму та напруги через фотоприймачі В7-35, для вимірювання струму через світлодіоди MS2809). Основний блок має вигляд, наведений на рис.3, і складається з верхньої та нижньої частини.

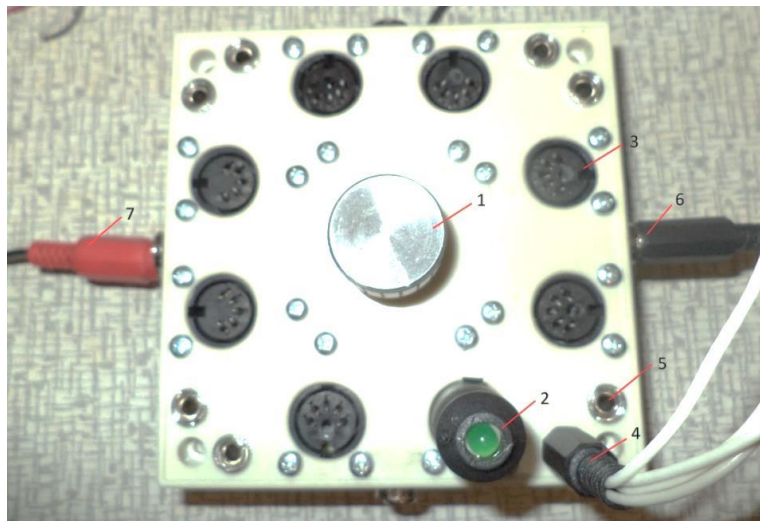
В верхній частині блоку розташовано 8 видів фотоприймачів та 8 роз'ємів для підключення джерел світла, 12 роз'ємів для підключення вимірювальних приладів:

а) 4 роз'єма для підключення приладу, що вимірює струм в джерелі світла;

б) 8 роз'ємів для підключення приладів, що вимірюють напругу на фотоприймачах та напругу на вимірювальному резисторі, яка пропорційна струму через фотоприймач.

Також у верхній частині блоку розташовано резистор R1, за допомогою якого можна змінювати напругу на фотоприймачі.

Нижня частина блоку представляє собою конструкцію, що містить джерело живлення світлодіодів та джерело напруги для фотоприймачів, а на бокових поверхнях розміщено 4 взаємозамінні роз'єма для підключення контролера світлодіодів.



1 – ручка резистора R1; 2 – джерело світла в робочому положенні; 3 – фотоприймач в корпусі; 4 – вивод на вимірювальний блок фотоприймача; 5 – роз'єм для підключення вимірювальних приладів до фотоприймача; 6 – вивод вимірювального приладу світлодіода; 7 – вивод контролера світлодіода

Рисунок 3 – Основний блок (вид зверху)

В якості джерел світла використовуються 10 світлодіодів з різною λ_{\max} , але з можливістю за допомогою струму регулювати потужність випромінювання. Використовувані у роботі світло діоди наведені у табл.1. В роботі використовуються 8 типів фотоприймачів, характеристики яких зведені у табл.2:

- фоторезистори (4шт):ФР-11(Cd-Se),ФПФ-7(CdS),ФРР-2 (PbS),ФРР-4 (PbSe),
- фотодіоди (2 шт): BPW-21R(p-n), SF229FA(p-i-n)
- фототранзистори (2шт): ФТГЗ(Ge), НРТСЗС-44J (Si)

Таблиця 1. Характеристики джерел світла

№	Марка світлодіода	Матеріал світлодіода	λ_{\max} нм,	I_{LED} для забезпечення потужності світла 5 мВт/см ² , мА	Кут випромінювання,°
1	GNL-3014VC	InGaN	400	1,15	25
2	GNL-5013UBC	InGaN	470	0,33	18
3	GNL-5013PGC-TL	InGaN	525	1	18
4	GNL-5013UYC	AlGaInP	590	3,15	18
5	GNL-5013UEC-TL	AlGaInP	625	1,9	18
6	L7113SEC/H	InGaAlP	640	3,06	20
7	GNL-5013URC	GaAlAs	660	3,65	18
8	L-7113SF7C	GaAs	850	1,55	20
9	SFH 487	GaAlAs	880	2,6	20
10	HL-503IR3C-L3	GaAs	940	2,36	20

Таблиця 2. Характеристики фотоприймачів

№ ФП	U _{роб} , В	R _{вим} , кОм	Темнові та світлові ВАХ		ЛАХ	
			діапазон та крок вимірювань	параметр	діапазон та крок вимірювань	параметр
			U, В	I _{LED} , мА/ Е, лк	I _{LED} , мА	U, В
ФП1	2	2,5*10 ³	U=1...5В ΔU=0,5В	0; 1,5; 2; 2,5 мА/ 0; 40; 50; 60 лк	I _{LED} =1...2,5мА Δ I _{LED} =0,25мА	2; 3,5; 5
ФП2		10	U=1...3В ΔU=0,25В	0; 0,25; 0,5; 0,75 мА/ 0; 15; 30; 45 лк	I _{LED} =0,25...0,75мА Δ I _{LED} =0,05мА	1; 2; 3
ФП3		100	U=1,5...8В ΔU=0,5В	0; 1; 2; 3 мА/ 0; 400; 800; 1200 лк	I _{LED} =0,5...4мА Δ I _{LED} =0,5мА	2; 4; 6
ФП4		103	U=1,5...8В ΔU=0,5В	0; 1; 1,5; 2 мА/ 0; 30; 40; 50 лк	I _{LED} =0,5...2мА Δ I _{LED} =0,25мА	1; 3; 6
ФП5	3	10	U=1...5В ΔU=0,5В	0; 1; 1,5; 2 мА/ 0; 15; 30; 45 лк	I _{LED} =0,5...4мА Δ I _{LED} =0,5мА	2; 4; 6
ФП6		100	U=1...5В ΔU=0,5В	0; 1; 2; 3 мА/ 0; 15; 30; 45 лк	I _{LED} =0,5...2мА Δ I _{LED} =0,25мА	1; 3; 6
ФП7	0,8	10 ³	U=0,6...1,2В ΔU=0,1В	0; 5; 10; 15 мА/ 0; 10; 20; 30 лк	I _{LED} =5...15мА Δ I _{LED} =1мА	0,5; 0,7; 0,9
ФП8	2	10	U=1,5...6В ΔU=0,5В	0; 1,5; 2; 2,5 мА/ 0; 250; 350; 450 лк	I _{LED} =1...3мА Δ I _{LED} =0,25мА	2; 4; 6

Порядок виконання роботи

1. Ввімкнути вимірювальний стенд.
2. Виміряти спектральну характеристику фоточутливості 2 фотоприймачів, тобто залежність фотоструму через фотоприймач від довжини хвилі випромінювання джерела світла (світлодіода) (№ фотоприймача задається викладачем).

2.1. Під'єднати вимірювальні прилади ($U_{\text{ФП}}$, $U_{\text{R}} \sim I_{\text{ФП}}$) до заданого фотоприймача.

2.2. Розмістити джерело випромінювання (світлодіод) в закритий оптичний канал навпроти заданого фотоприймача.

2.3. Перевести перемикач на контролері світлодіодів з положення " $I_{\text{LED}}=0$ " в положення " $I_{\text{LED}} \neq 0$ ".

2.4. Виставити струм через світлодіод за допомогою ручок SILVER чи GOLD на контролері світлодіодів, що забезпечує потужність випромінювання 5 Вт/см^2 (величина струму вказана для кожного світлодіода у табл.1).

2.5. Виставити на фотоприймачі за допомогою ручки резистора R1 робочу напругу, вказану у табл.2.

2.6. Виміряти значення напруги на вимірювальному резисторі, що пропорційна струму через фотоприймач ($U_{\text{R}} \sim I_{\text{ФП}}$).

2.7. Перевести перемикач на контролері світлодіодів з положення " $I_{\text{LED}} \neq 0$ " в положення " $I_{\text{LED}}=0$ " та змінити джерело світла (світлодіод).

2.8. Провести аналогічні виміри для 9 інших джерел світла (повторити п.н.2.3-2.7).

2.9. Повторити п.н.2.1-2.8 для другого фотоприймача.

2.10. З отриманих результатів визначити λ_{max} для обох фотоприймачів.

3. Виміряти темнову ВАХ для 2 фотоприймачів.

3.1. Перевести перемикач на контролері світлодіодів з положення " $I_{\text{LED}} \neq 0$ " в положення " $I_{\text{LED}}=0$ ".

3.2. Під'єднати вимірювальні прилади ($U_{\text{ФП}}$, $U_R \sim I_{\text{ФП}}$) до заданого фотоприймача.

3.3. Розмістити джерело випромінювання (світлодіод) з довжиною хвилі λ_{max} в закритий оптичний канал навпроти заданого фотоприймача.

3.4. Виміряти залежність темнового струму на фотоприймачі ($U_R \sim I_{\text{ФП}}$) від величини напруги на ньому ($U_{\text{ФП}}$), яку змінюють за допомогою ручки резистора R1. Межі та крок вимірювання відповідного фотоприймача вказані у табл.2.

4. Виміряти сімейство світлових ВАХ 2 фотоприймачів при 3 рівнях освітленості, що задається струмом через світлодіод (I_{LED}) з довжиною хвилі λ_{max} (табл.1).

4.1. Перевести перемикач на контролері світлодіодів з положення " $I_{\text{LED}}=0$ " в положення " $I_{\text{LED}} \neq 0$ ".

4.2. Виставити струм через світлодіод за допомогою ручок SILVER чи GOLD (на контролері світлодіодів) на одному із 3 вказаних у табл. 2 рівні.

4.3. Виміряти залежність світлового струму на фотоприймачі ($U_R \sim I_{\text{ФП}}$) від величини напруги на ньому ($U_{\text{ФП}}$), яку змінюють за допомогою ручки резистора R1. Межі та крок вимірювання відповідного фотоприймача вказані у табл.2.

4.4. Провести аналогічні виміри при двох інших рівнях освітленості (повторити п.н.4.2-4.3).

4.5. Перевести перемикач на контролері світлодіодів з положення " $I_{\text{LED}} \neq 0$ " в положення " $I_{\text{LED}}=0$ ".

4.6. Розмістити джерело світла навпроти другого фотоприймача і провести аналогічні виміри (повторити п.н.4.1-4.4).

5. Виміряти сімейство люкс-амперних характеристик (ЛАХ) для 2 фотоприймачів при 3 робочих напругах.

5.1. Виставити на фотоприймачі за допомогою ручки резистора R1 першу робочу напругу, вказану у табл.2.

5.2. Виміряти залежність фотоструму ($U_R \sim I_{\text{ФП}}$) від рівня освітленості, що задається струмом через світлодіод (I_{LED}), межі і крок якого вказані у табл..2.
Під час проведення вимірювань особливу увагу слід звернути на утримування напруги фотоприймача на постійному рівні!

5.3. Провести аналогічні виміри для двох інших робочих напруг (тобто повторити п.н.5.1-5.2).

5.4. Перевести перемикач на контролері світлодіодів з положення " $I_{\text{LED}} \neq 0$ " в положення " $I_{\text{LED}} = 0$ ".

5.5. Розмістити джерело світла навпроти другого фотоприймача і провести аналогічні виміри (повторити п.н.5.1-5.4).

6. Вимкнути вимірювальний стенд, світлодіод видалити з оптичного каналу.

Обробка результатів

1. Для виміряної спектральної характеристики розрахувати фотострум через фотоприймач з $U_R \sim I_{\text{ФП}}$ (величина відповідного вимірювального резистора вказана у табл..2).
2. Побудувати спектральну залежність фотоструму для кожного фотоприймача окремо, позначити λ_{max} .
3. На основі спектральної характеристики чутливості встановити матеріал і\або структуру фотоприймачів.
4. Для виміряної темної та світлової воль-амперної характеристики розрахувати темновий і фотострум через фотоприймач з $U_R \sim I_{\text{ФП}}$ (величина відповідного вимірювального резистора вказана у табл..2).
5. Перевести по табл.1 струм світлодіода в освітленість поверхні фотоприймача.
6. Побудувати суміщений графік темної ВАХ та сімейства світлових ВАХ на 1 графіку для кожного фотоприймача.

7. Для вимірної люкс-амперної характеристики розрахувати фотострум через фотоприймач з $U_R \sim I_{ФП}$ (величина відповідного вимірювального резистора вказана у табл..2).
8. Побудувати сімейство ЛАХ для кожного фотоприймача.
9. Розрахувати коефіцієнт фоточутливості за формулою (1). Площа фото активної поверхні (площа оптичного каналу) розраховується як площа круга діаметром 2 мм.
10. Зробити висновок про рівень фоточутливості кожного фотоприймача і про ефективність їх використання в різних частинах спектру.

Контрольні запитання

1. В чому полягає принцип дії фоторезистора?
2. Які матеріали використовуються для виготовлення фоторезисторів?
3. Перелічіть основні характеристики фоторезисторів.
4. Чим обумовлений максимум на спектральній характеристиці фоточутливості фотоприймачів резистивного типу?
5. В чому полягає принцип дії фотодіода?
6. Які матеріали використовуються для виготовлення фотодіодів?
7. Перелічіть основні характеристики фотодіодів.
8. Чим обумовлений максимум на спектральній характеристиці фоточутливості фотоприймачів діодного типу?
9. Які режими роботи фотодіодів Ви знаєте?
10. Перелічіть переваги р-і-п структури фотодіода.
11. В чому полягає принцип дії фототранзистора?
12. Які матеріали використовуються для виготовлення фототранзисторів?
13. Перелічіть основні характеристики фототранзисторів.
14. Які режими роботи фототранзисторів Ви знаєте?
15. Вкажіть переваги та недоліки 3 класів фотоприймачів – фоторезисторів, фотодіодів та фототранзисторів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

Дослідження характеристик фотоелектричних перетворювачів

Мета роботи – ознайомитись з принципом дії та різновидами фотоелектричних перетворювачів, набути практичних навичок у вимірюванні основних характеристик та розрахунку основних параметрів сонячних елементів.

Теоретичні відомості

Основу будь-яких фотоелементів складає напівпровідникова структура з *p-n*-переходом (рис. 1), яка виникає на границі двох напівпровідників з різними типами провідності. Сонячний елемент (СЕ) або ФЕП дозволяє перетворювати енергію оптичного випромінювання безпосередньо в електроенергію, оминаючи стадії теплової та механічної форм енергії.

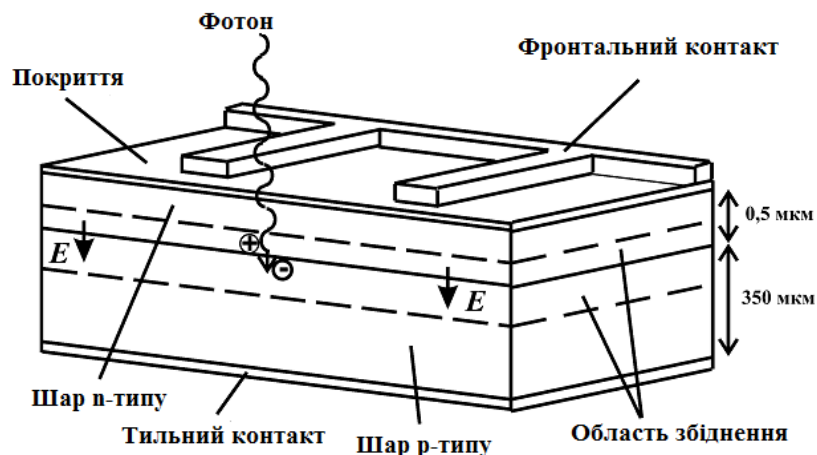


Рисунок 1 – Структура кремнієвого монокристалічного сонячного елемента

Коли СЕ освітлюється, фотони, які поглинаються, генерують нерівноважні електрон - діркові пари. Електрони, що генеруються в p - шарі поблизу p - n переходу, підходять до p - n - переходу та існуючим у ньому електричним полем виносяться в n - область. Аналогічно і надлишкові дірки, створені в n - шарі, частково переносяться в p - шар (рис. 2, а). У результаті n - шар набуває додаткового негативного заряду, а p - шар - позитивного. Знижується первісна контактна різниця потенціалів між p - і n - шарами напівпровідника, і в зовнішньому колі з'являється напруга (рис.2, б). Негативному полюсу джерела струму відповідає n - шар, а p - шар – позитивному.

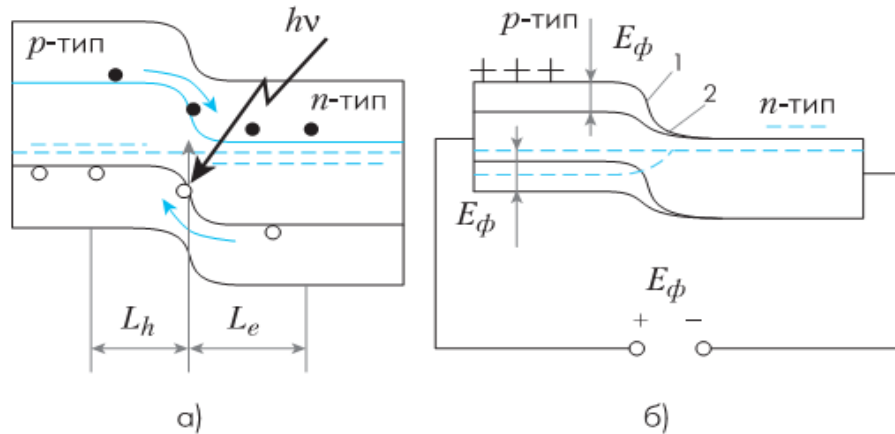


Рисунок 2 – Зонна модель p - n переходу: а) в початковий момент освітлення; б) зміна зонної моделі під дією постійного освітлення і виникнення фотоЕРС

Процес перетворення сонячної енергії в електричну можна умовно розбити на чотири стадії: 1) поглинання світла; 2) генерація електронно-діркових пар; 3) розподіл носіїв заряду p - n переходом; 4) збирання носіїв заряду на електродах. Ці чотири стадії перетворення сонячної енергії можна виділити в роботі практично усіх існуючих СЕ. Непроодуктивність роботи однієї з цих стадій призводить до зниження ефективності перетворення енергії сонячного елемента в цілому.

Для опису сонячних елементів застосовують набір спеціальних параметрів та характеристик:

1. Максимальна електрична потужність P_M , що передається в навантаження.
2. U_{XX} – напруга розімкнутого кола, це максимальна напруга, що виникає на розімкнутих виводах сонячного елемента при опроміненні світлом. Знаходиться як при прямому вимірюванні, так і з вольт-амперної характеристики.
3. $J_{KЗ}$ – густина струму короткого замикання, максимальний фотострум, що протікає через виводи СЕ при їх короткому замиканні. Густина струму короткого замикання ($I_{KЗ}$) визначається як відношення струму короткого замикання до площі поверхні СЕ:

$$J_{KЗ} = I_{KЗ} / S \quad (1)$$

4. ККД – коефіцієнт корисної дії, показує, яку частину (в процентному відношенні) сонячної енергії, яка потрапляє на СЕ, можна перетворити в електричну енергію:

$$\eta = \frac{P_M}{P} = \frac{ff \cdot J_{KЗ} \cdot U_{XX}}{P}, \quad (2)$$

де P – потужність падаючого на СЕ випромінювання, яка припадає на одиницю поверхні, P_M – максимальна вихідна потужність СЕ, віднесена до його площі, $J_{KЗ}$ - густина струму короткого замикання, U_{XX} - напруга холостого ходу.

5. ff – коефіцієнт заповнення, показує яка частина потужності, що виробляє сонячний елемент, використовується в навантаженні; вимірюється в % і варіюється від 50 до 85 % для різних типів СЕ.

$$ff = \frac{J_M \cdot U_M}{J_{KЗ} \cdot U_{XX}}, \quad (3)$$

де U_M і J_M – напруга і густина струму, що відповідають точці найбільшої потужності P_M .

Дослідження вольт-амперних характеристик, а точніше навантажувальних характеристик сонячного елемента (рис.3) при різних температурах та інтенсивності падаючого випромінювання дозволяє отримати важливі данні про якість переходу та механізм переносу носіїв заряду.

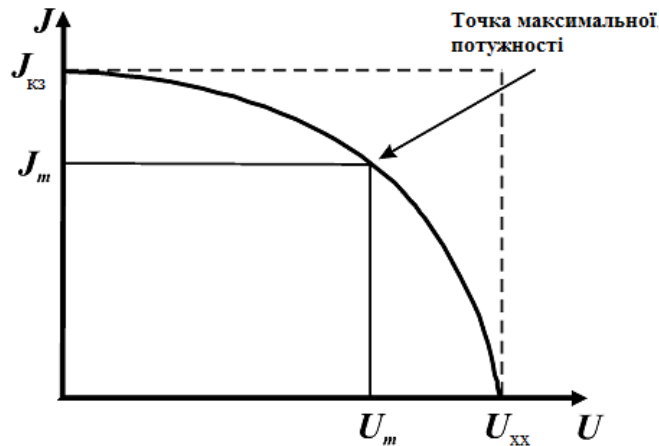


Рисунок 3 – Навантажувальна характеристика сонячного елемента

Для ефективності роботи ФЕП необхідно дотримуватись низки умов:

- оптичний коефіцієнт поглинання активного шару напівпровідника повинен бути достатньо великим, для того щоб забезпечити поглинання суттєвої частини енергії сонячного світла в межах товщина шару;
- згенеровані при освітлені електрони і дірки мають ефективно збиратися на контактних електродах з обох сторін активного шару;
- сонячний елемент повинен мати значну висоту бар'єру в напівпровідниковому переході;
- повний опір, увімкнений з сонячним елементом (виключаючи опір навантаження), повинен бути малим для того, щоб зменшити втрати потужності в процесі роботи.

СЕ можна класифікувати по інтенсивності збирання світла, за хімічним складом, товщиною та кристалічній структурі шарів, кількості суміщених на одній підкладці елементів і т. д.

За інтенсивністю збирання світла сонячні елементи поділяються на одиничні і концентраторні. Більша частина СЕ не мають спеціальних пристроїв для збирання світу і поглинають лише ті світлові потоки, що падають на займану ними площу поверхні. Концентраторні сонячні елементи мають спеціальні концентруючі світлові пристрої (лінзи або дзеркала), які дозволяють збільшувати щільність світлового потоку на поверхні елементів у кілька разів. Як правило, концентраторні елементи виготовляються з дорогих світлопоглинаючих матеріалів з найкращими показниками фотовольтаїчного перетворення світла. У позначенні таких сонячних елементів обов'язково вказується коефіцієнт збирання світла, що вимірюється в сонцях (suns). Коефіцієнт збирання показує, у скільки разів збільшиться щільність потоку падаючого на СЕ випромінювання після його оптичного збирання концентруючою системою.

За кристалічним складом поглинаючого матеріалу СЕ поділяються на монокристалічні, мультикристалічні, полікристалічні, мікрокристалічні, нанокристалічні. Монокристалічні сонячні елементи являють собою сонячні елементи з поглиначем у вигляді цілісного кристала напівпровідникової речовини. Мульти-, полі-, мікро- і нанокристалічні СЕ як поглинаючу речовину мають суміш напівпровідникових кристалітів з різною орієнтацією, структурою і формою, розмір яких і визначає тип сонячного елемента: при розмірах кристалітів від 1 до 100 мм речовини називають мультикристалічними, від 1 до 1000 мкм – полікристалічними, менше 1 мкм – мікрокристалічними, менше 100 нм – нанокристалічними.

Залежно від складу поглинаючого матеріалу сонячні елементи поділяються на кремнієві, на основі $A^{III}B^V$ напівпровідників, на основі $A^{II}B^{VI}$ (в основному $CdTe$), на основі $A^IB^{III}C^{VI}_2$ напівпровідників і змішані.

Найбільше розповсюджені СЕ з монокристалічного кремнію. Це пов'язано з наступними причинами: відпрацьована технологія отримання кремнію та створення р-n переходів, високе значення параметрів (надійність, стабільність, ККД до 20% при прямому освітленні, для промислових виробів 14 – 17%). Для СЕ з більш дешевого полікристалічного кремнію ККД досягає 12 – 14%. Основним недоліком монокристалічних кремнієвих ФЕП – великі витрати відносно дорогого високочистого кремнію, велика частина якого грає роль пасивної підкладки.

В тонкоплівкових ФЕП активними напівпровідниковими шарами є полікристалічні або аморфні плівки, які наносяться або вирощуються на електрично активних або пасивних підкладках. Основна перевага тонкоплівкових СЕ полягає в тому, що їх вартість може бути низькою, оскільки технологія їх виготовлення дешева і при цьому використовується порівняно дешеві матеріали. Крім того, варто зазначити, що ФЕП на основі a-Si:H завдяки характеристикам аморфного кремнію (температурний коефіцієнт та спектральна залежність коефіцієнта поглинання) забезпечує більш високу ефективність перетворення сонячної енергії при температурах 40-60°C та в умовах хмарності. До основних недоліків відносять низький ККД та поступова деградація параметрів.

Серед сучасних комерційних застосувань домінують, в основному, сонячні елементи першого покоління, створені на базі монокристалів кремнію або на основі полікристалічних пластин. Різке зростання ціни енергоресурсів змусило переглянути політику в галузі розробки СЕ. Вартість стала визначальним фактором при оцінці перспектив застосування сонячних

елементів. Цій технології належить 86 % ринку фотоелектричних елементів наземного призначення.

Саме прагнення знизити ціну сонячних панелей стимулює масове виробництво тонкоплівкових сонячних батарей, які можна розглядати як друге покоління фотоелектричних перетворювачів. Зниження вартості відбувається, в основному, за рахунок того, що елементи другого покоління не вимагають компановки в батарею. Весь технологічний процес, як правило, здійснюється на одній технологічній лінійці в автоматичному режимі. Так що на виході отримують готовий модуль потужністю від декількох Вт до декількох десятків Вт. Тонкоплівкові елементи можна розділити на два типи: на основі плівок полікристалічних напівпровідників і на основі плівок аморфних напівпровідників. Для обох типів ефективність приблизно однакова і для СЕ великої площі не перевищує 12 %. Основною причиною низького ККД є наявність в плівках великої кількості дефектів і як наслідок цього малий коефіцієнт збирання носіїв.

Наступне покоління сонячних елементів значно відрізняється від двох попередніх. Для створення елементів нового типу найперспективнішим є конструкція, де система квантових точок поміщена в аморфну кремнієву матрицю. Така технологія забезпечує більш високу ефективність самої батареї, крім того, зникає потреба в масивних підкладках з монокристалічного кремнію, витрати цього матеріалу зменшуються.

Опис вимірювального стенду

Лабораторний стенд для вимірювання навантажувальних характеристик сонячних елементів складається з імітатора сонячного світла спектру АМ1,5, водоохолоджуваного мідного столику, набору окремих сонячних елементів та двох ланок сонячних елементів, з'єднаних послідовно (сонячні батареї),

магазину опорів Р33, вимірювального приладу В7-21 (струм та напруга на ФЕП, перемикання між якими здійснюється шляхом натискання або відтискання відповідної кнопки I/U на панелі управління), вимірювача потужності сонячного спектру Ezodo-45.

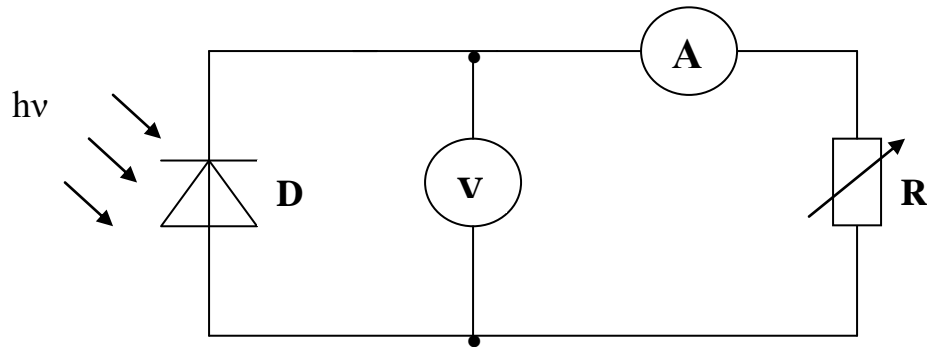


Рисунок 4 – Електрична схема для вимірювання навантажувальної ВАХ сонячних елементів

Електрична схема для вимірювання навантажувальної ВАХ сонячних елементів наведена на рис.4, де позначення на схемі наступні: D – досліджуваний зразок (фотоелектричний перетворювач); A – амперметр (В7-21); V – вольтметр (В7-21); R – магазин опорів Р33; $h\nu$ – імітатор сонячного випромінювання АМ1,5.

Порядок виконання роботи

1. Виміряти навантажувальні ВАХ сонячних елементів (номери зразків сонячних елементів задаються викладачем).

1.1. Ввімкнути вольтметр універсальний В7-21 та імітатор сонячного світла.

1.2. Відсунути мідний столик зразків та встановити вимірювач потужності Ezodo-45 у пластикову капсулу, вмонтовану у стіл лабораторної роботи.

Встановити за допомогою рухомого штативу та фіксатора відстань від лампи до вхідного вікна Ezodo-45 таку, що забезпечить потужність світлового випромінювання на рівні 1000 Вт/м^2 (за показаннями Ezodo-45). Витягнути прилад Ezodo-45 з капсули, встановити мідний столик під лампу імітатора і за допомогою пінцету розмістити на столику відповідний фотоперетворювач.

1.3. Фотоперетворювачі розміщуються наступним чином: тильний контакт ФЕП – на мідну поверхню робочого столика, верхній зонд – на фронтальний контактний майданчик ФЕП. Зверніть увагу, що вимірювальний зонд можна пересувати лише після зняття фіксатора, розташованого праворуч на консолі (ручка чорного кольору). На магазині опорів Р33 тумблер «ВАХ» / «Урк/Ікз» перевести в положення «ВАХ».

1.4. Змінюючи величину навантаження ФЕП за допомогою магазину опорів Р33, виміряти навантажувальну ВАХ фотоелектричних перетворювачів (залежність струму від напруги при певній освітленості) за допомогою вольтметра універсального В7-21. Крок вимірювань обирається самостійно з розрахунку не менше 10-12 точок на кривій.

1.5. Повторити п.н.1.3–1.6 для двох інших рівней освітленості ФЕП: 1500 та 2000 Вт/м^2 . Зміна рівня освітленості виконується відповідно до п. 1.2.

1.6. Провести аналогічні вимірювання для всіх зразків ФЕП (повторити п.н.1.2-1.5).

1.7. Вимкнути вольтметр універсальний В7-21 та лампу імітатора сонячного спектру.

1.8. Виміряти площу заданих зразків ФЕП.

2. Вивчити різні способи з'єднання сонячних елементів в батарею, а саме: виміряти струм короткого замикання та напругу розімкнутого кола при послідовному та паралельному з'єднанні елементів у батарею.

2.1. Ввимкнути вольтметр універсальний В7-21 та імітатор сонячного світла.

2.2. Відсунути мідний столик зразків та встановити вимірювач потужності Ezodo-45 у пластикову капсулу, вмонтовану у стіл лабораторної роботи. Встановити за допомогою рухомого штативу та фіксатора відстань від лампи до вхідного вікна Ezodo-45 таку, що забезпечить потужність світлового випромінювання на рівні 1000 Вт/м^2 (за показаннями Ezodo-45). Витягнути прилад Ezodo-45 з капсули та встановити мідний столик під лампу імітатора.

2.3. Розмістити фотоелектричну ланку №1 на водоохолоджуваному столику під імітатором сонячного випромінювання.

2.4. Під'єднати виводи фотоелектричної ланки №1 у відповідні роз'єми верхньої панелі магазину опорів Р33 («Спільний», «Урк» або «Ікз»).

2.5. Провести вимірювання фотоелектричних параметрів (Урк, Ікз) ланки №1 за допомогою вольтметра універсального В7-21.

2.6. Повторити п.н.2.3–2.5 для фотоелектричної ланки №2.

2.7. З'єднати фотоелектричну ланку №1 та №2 послідовно та провести вимірювання, вказані у п.н.2.3-2.5.

2.8. З'єднати фотоелектричну ланку №1 та №2 паралельно та провести вимірювання, вказані у п.н.2.3-2.5.

2.9. Вимкнути вольтметр В7-21 та лампу імітатора сонячного спектру.

2.10. ***Увага! Лампу імітатора можна вмикати тільки під час вимірювань рівня потужності, струму короткого замикання та напруги розімкнутого кола! Забороняється тримати лампу імітатора ввімкненою під час пересування робочого столика та встановлення зразків ФЕП!***

Обробка результатів

1. Побудувати сімейство навантажувальних характеристик для кожного ФЕП.

2. Графічно визначити напругу розімкнутого кола та струм короткого замикання.
3. Використовуючи формули 1–3, розрахувати коефіцієнт заповнення, максимальну потужність та ККД сонячних елементів.
4. Звести отримані результати у підсумкову таблицю.
5. Зробити висновок про матеріал досліджуваних фотоприймачів (монокристалічний чи аморфний кремній), вплив різноманітних технологічних операцій на характеристики ФЕП (текстурування, просвітлююче покриття, матеріал тильного контакту, площа ФЕП – в залежності від поставленого завдання викладачем).
6. Розрахувати теоретично фотоелектричні параметри фотоелектричної батареї при її послідовному та паралельному з'єднанні і порівняти з експериментально отриманими даними.
7. Зробити висновок про переваги та недоліки різних способів з'єднання сонячних елементів в батарею.

Контрольні запитання

1. В чому полягає принцип дії сонячного елемента?
2. Які основні параметри і характеристики фотоперетворювача Ви знаєте?
3. Які матеріали використовуються для виготовлення ФЕП?
4. Розкрийте переваги та недоліки сонячних елементів першого покоління.
5. В чому особливість сонячних елементів другого покоління?
6. Що являють собою ФЕП третього покоління?
7. З яких стадій складається процес перетворення сонячної енергії?
8. Перелічіть основні вимоги для ефективної роботи ФЕП.
9. В чому полягає ідея застосування просвітлюючого покриття в конструкції сонячних елементів?
10. Навіщо використовують текстурування поверхні сонячного елемента?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

Дослідження характеристик світлодіодів

Мета роботи – ознайомитись з принципом дії та різновидами світлодіодів, набути практичних навичок у вимірюванні їх основних характеристик та розрахунку основних параметрів.

Теоретичні відомості

Світлодіод (СД) – це напівпровідниковий діод, який випромінює некогерентне випромінювання при пропусканні через нього струму у прямому напрямі. В такому приладі здійснюється перетворення електричної енергії у світлову. Таке перетворення має місце за рахунок випромінювальної рекомбінації надлишкових носіїв заряду, яка виникає за певних умов в області ОПЗ р-п-переходу, а також у прилеглих до неї частинах р- та п-областей. Одним із способів створення надлишкових носіїв заряду в напівпровіднику є пропускання крізь р-п-перехід струму. При цьому має місце інжекція нерівноважних носіїв заряду в р-, п-області та ОПЗ р-п-переходу. Випромінювальна рекомбінація, викликана протіканням струму у прямому напрямку через р-п-перехід, називається електролюмінесценцією. Спектральний склад випромінювання світлодіода визначається структурою енергетичного спектру матеріалу, з якого він виготовлений, а також наявними у матеріалі домішками. Змінюючи склад матеріалу світлодіоду можна отримати світло в будь-якій частині оптичного діапазону – ультрафіолетове, видиме чи інфрачервоне випромінювання.

Не всі напівпровідникові матеріали ефективно випромінюють світло. Найкращими випромінювачами є прямозонні напівпровідники, наприклад, GaAs, InP, ZnSe тощо. Однак непрямоzonні матеріали при введенні певних

домішок також використовуються для синтезу світлодіодів, хоча у значно меншій мірі через низьку ефективність процесу випромінювання. Наприклад, матеріал GaP з домішками N випромінює зелений колір, GaP з домішками Zn-O – червоний колір. Механізм виникнення випромінювання в непрямо зонних матеріалах за участі домішкових атомів полягає у наступному. Спочатку домішковий атом захоплює інжектований електрон, а далі дірку, утворюючи зв'язаний екситон. Наступна анігіляція такої електрон-діркової пари призводить до утворення фотону.

До матеріалів, які широко використовуються на сьогодні, відносяться різноманітні тверді багатокомпонентні розчини, змінюючи склад яких, можна керувати величиною ширини забороненої зони і відповідна кольором випромінювання. Так, додаючи до GaAs домішки Al можна збільшити ширину забороненої зони від 1,4 до 2 еВ і змінити колір випромінювання від ІЧ до червоного. Слід при цьому відмітити, що вміст домішок алюмінію не повинен перевищувати 45 %, оскільки за вищого вмісту твердий розчин стає непрямозонним матеріалом. Іншим поширеним багатокомпонентним твердим розчином є AlGaInP, збільшуючи вміст у якому алюмінію можна змінити колір по схемі червоний – оранжевий – жовтий – зелений. Однак, як і у попередньому випадку, вміст алюмінію не повинен перевищувати 50 %. Для створення світлодіодів з випромінюванням у високоенергетичній частині оптичного діапазону використовують матеріали на основі GaN. Нітрид галію випромінює ультрафіолетове світло, однак якщо до його складу вводити домішки індію, то його заборонена зона буде зменшуватись, а випромінюване світло змінюватиме колір за схемою фіолетовий-синій-зелений. Теоретично вводити домішки індію до складу GaN можна до 100% і відповідно отримувати світло до ІЧ діапазону, однак існують певні технологічні труднощі при введенні даної домішки у великій кількості. Тому використання твердих розчинів InGaP обмежується зеленим кольором випромінювання.

Історично першими з'явилися світлодіоди, до яких не ставилась вимога високої яскравості, наприклад, коли світлодіоди використовувались в індикаторних пристроях. Однак для сучасних застосувань, наприклад, у світлофорах чи лампах денного світла, випромінювання світлодіода має бути видимим на великій відстані навіть у сонячний день. Коли не потрібна висока яскравість випромінювання, використовують СД на основі матеріалів GaP, GaAsP, а для виготовлення ультра яскравих СД – InGaN, GaAlAs.

Основними характеристиками світлодіодів є електричні (вольт-амперні характеристики), енергетичні (ватт-амперні характеристики), спектральні та гоніометричні характеристики. До основних параметрів даних приладів відносять довжину хвилі випромінювання (λ_{\max}), робоча напруга, сила світла, кут випромінювання.

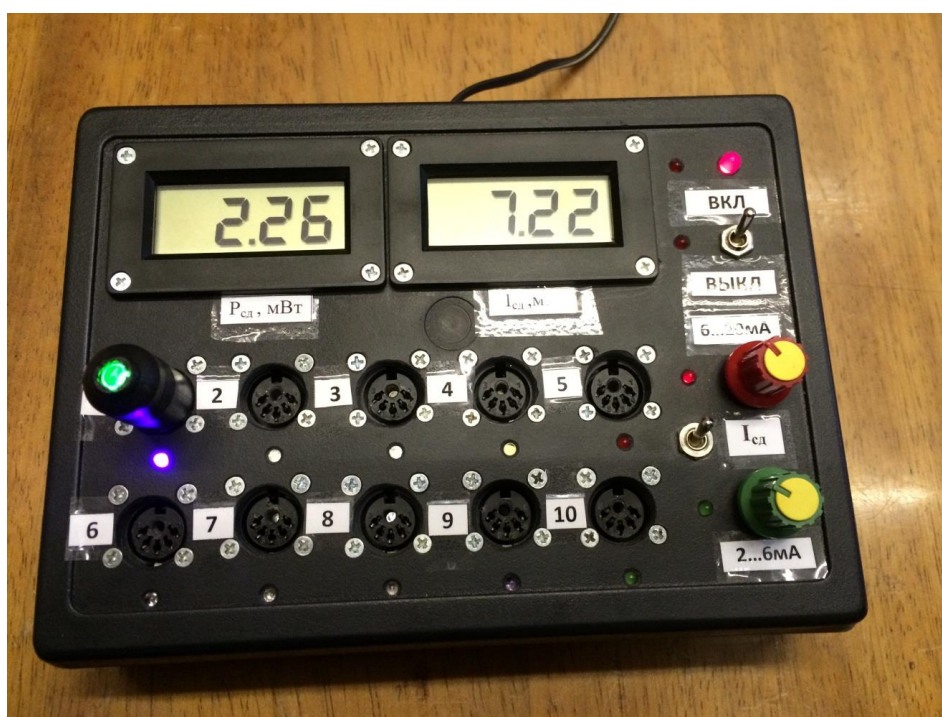
Опис вимірювального стенду та методика проведення вимірювань

Вимірювальний стенд складається з двох блоків, кожен з яких містить по 10 різних світлодіодів (СД). Блок 1 призначений для вимірювання електричних та спектральних характеристик світлодіодів, а Блок 2 – для вимірювання їх енергетичних характеристик. Зображення двох блоків наведено на рис.1.

За допомогою Блоку 1 проводиться вимірювання ВАХ світлодіодів та фотоструму фотоприймача при опроміненні його світлом різного кольору, але однакової потужності. Як видно з рис.1,а Блок 1 містить 10 світлодіодів, які пронумеровані від 1 до 10. Кожний світлодіод міститься в закритому оптичному каналі для мінімізації втрат при передачі світла від джерела до приймача (від світлодіода до фотоприймача).



а)



б)

Рисунок 1 – Зображення Блоку 1 (а) та Блоку 2 (б) (вид зверху)

У табл.1 наведено перелік використаних в Блоці 1 світлодіодів з їх основними паспортними даними. Слід відмітити, що послідовність СД у табл.1 та у Блоці 1 відрізняється, оскільки на основі проведених вимірювань студенти мають самостійно ідентифікувати задані викладачем світлодіоди.

Таблиця 1 – Перелік використаних СД у Блоці 1 з їх основними паспортними даними

№ п/п	Марка СД	Матеріал СД	λ_{max} , нм	Колір	$U_{тип}$, В	I_{min} , мкА	$I_{тип}$, мкА	кут
1	GNL-3014HD	GaP	700	Червоний	2.1	0,8	5	60°
2	GNL-3014URC	GaAlAs	660	Червоний	1.9	500	600	25°
3	GNL-3014UVC	InGaP	405	Фіолетовий	3	1600	2100	25°
4	GNL-3014GD	GaP	565	Зелений	2.1	2,5	15	60°
5	L-934SEC	InGaAlP	610	Оранжевий	2.0	480	1300	50°
6	GNL-3014UBC	InGaP	470	Синій	3.5	1200	2000	25°
7	SFH-487	GaAlAs	880	ІЧ	1.5	25 mW		20°
8	HL-308U51GC	InGaP	510	Зелений	3.2	6370	8200	25°
9	L-934SYC	InGaAlP	595	Жовтий	2.0	280	700	50°
10	L34F3C	GaAs	940	ІЧ	1.2	~20 mW		50°

Для проведення будь-яких вимірювань фотоприймач, що знаходиться у закритій капсулі (рис.2), розміщується у оптичний канал напроти відповідного світлодіода. У верхній частині капсули міститься сигнальний світлодіод зеленого кольору, який інформує про наявність електричного контакту у вимірювальній схемі.



Рисунок 2 – Зображення капсули, що містить фотоприймач

Вимірювання характеристик здійснюється за допомогою двох цифрових приладів: правий прилад “ $I_{CD}, \text{мА}$ ” виводить на екран величину струму через світлодіод, а лівий прилад “ $I_{\phi}, \text{мкА}$ ” / “ $U_{CD}, \text{В}$ ” – величину фотоструму фотоприймача або напругу на світлодіоді в залежності від положення тумблера “ I_{ϕ}/U_{CD} ” (від вибору режиму вимірювання – фотострум фотоприймача чи ВАХ світлодіода). Під лівим вимірювальним приладом розташовані два світлових індикатори, що вказують на обраний режим вимірювання в даний момент. Ручкою “ I_{CD}/U_{CD} ” в залежності від положення тумблера “ I_{ϕ}/U_{CD} ” можна керувати струмом, що протікає через СД, чи напругою, що подається на нього.

Для вимірювання ВАХ світлодіодів слід перемикнути тумблер “ I_{ϕ}/U_{CD} ” у праве положення. За допомогою ручки “ I_{CD}/U_{CD} ” подаємо на світлодіод напругу, яка відображається на лівому вимірювальному приладі, та вимірюємо струм, який при цьому протікає через СД, що відображається на правому вимірювальному приладі.

Для вимірювання фотоструму фотоприймача при опроміненні його світлом різного кольору, але однакової потужності (при розташуванні капсули по черзі напроти різних світлодіодів), слід перемикнути тумблер “ I_{ϕ}/U_{CD} ” у ліве положення. За допомогою ручки “ I_{CD}/U_{CD} ” виставляємо на світлодіоді величину струму, що задана у табл.2 для кожного СД, і яка відображається на правому

вимірювальному приладі, та вимірюємо відповідний фотострум фотоприймача, що відображається на лівому вимірювальному приладі.

Таблиця 2 – Значення струмів через світлодіоди, які забезпечують однакову величину потужності випромінювання в межах свого діапазону

	СД низької потужності		СД середньої потужності					СД високої потужності		
	СД1	СД2	СД4	СД6	СД7	СД8	СД9	СД3	СД5	СД10
$I_{CD, mA}$	2,22	19,26	2,27	3,61	3,06	16,7	7,82	3,88	6,0	5,21

На основі проведених вимірювань розраховується довжина хвилі випромінювання (λ_{max}) двома методами, описаними нижче (за висотою потенціального бар'єру та спектральною залежністю чутливості фотоприймача).

Відомо, що контактна різниця потенціалів напівпровідникового діода співвідноситься з шириною забороненої зони напівпровідника, з якого він виготовлений, наступним чином:

$$\varphi_k \approx \frac{\Delta E_g}{e} \quad (1)$$

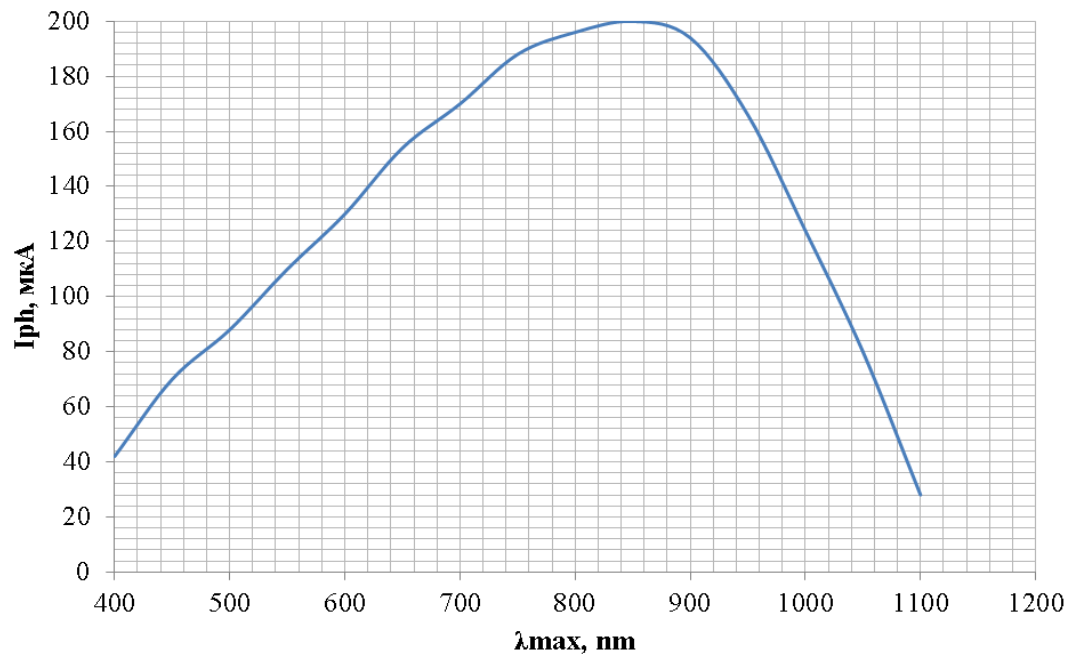
Величину контактної різниці потенціалів можна визначити графічно з ВАХ, провівши дотичну до лінійної ділянки ВАХ до перетину з віссю напруг. Як слідує з рівності (1), контактна різниця потенціалів приблизно рівна ширині забороненої зони напівпровідника (елементарний заряд, вказаний у знаменнику, слугує лише для переводу еВ у В). З іншого боку відомо, що довжина хвилі випромінювання пов'язана з шириною забороненої зони законом Планка:

$$\lambda_{max} = \frac{h \cdot c}{\Delta E_g} \quad (2)$$

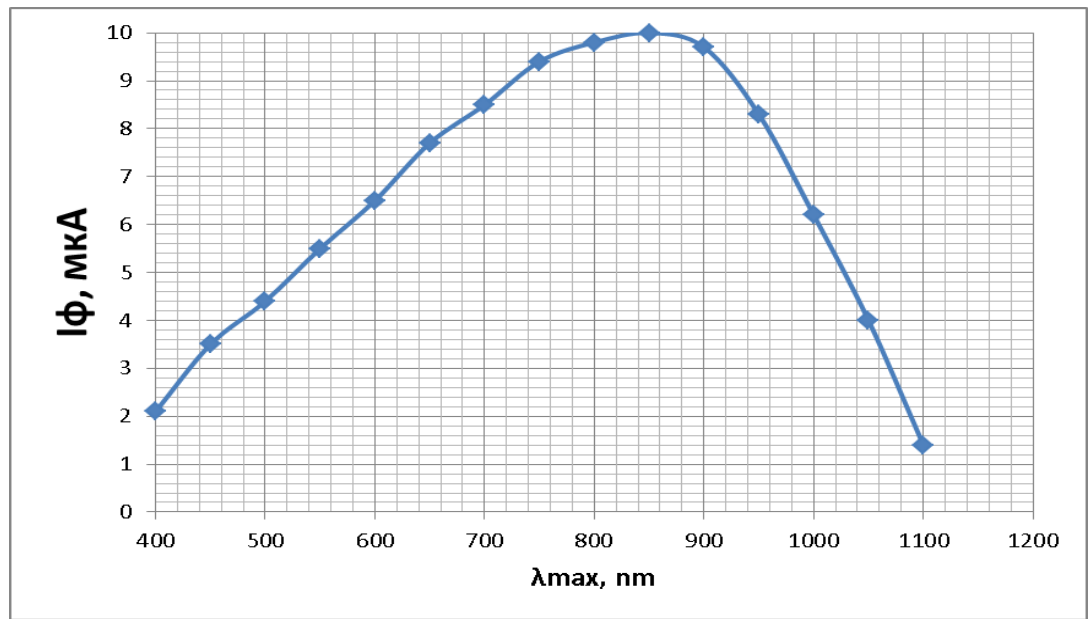
де h – стала Планка, c – швидкість поширення світла.

Підставивши у рівність (2) визначену графічно ширину забороненої зони з врахуванням рівності (1), можна оцінити довжину хвилі випромінювання відповідного світлодіода.

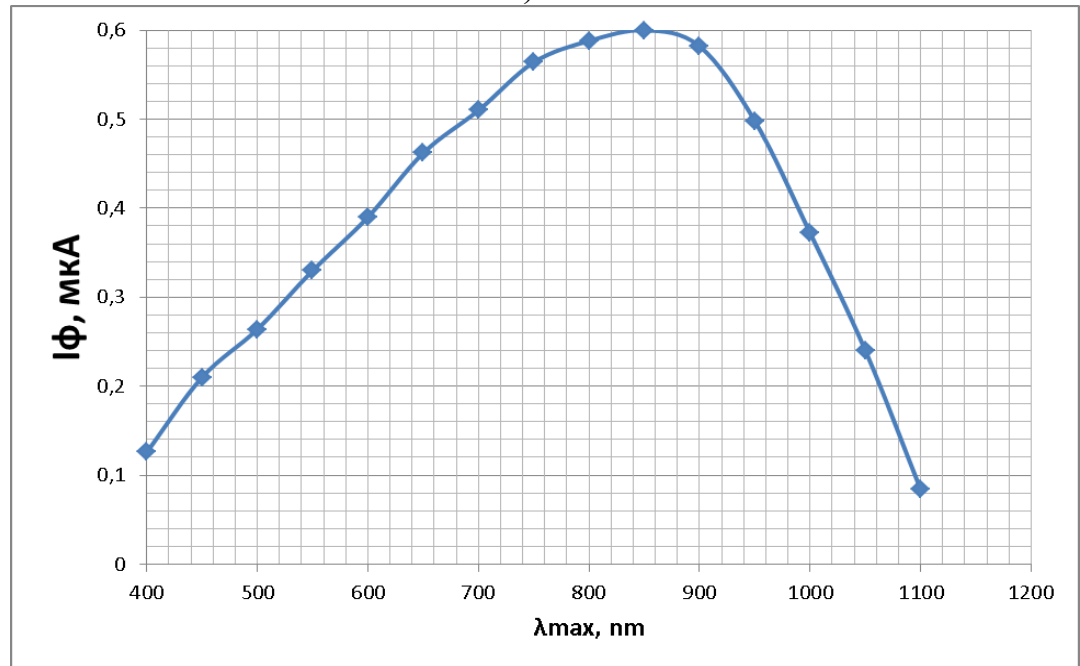
Інший метод визначення λ_{\max} полягає у вимірюванні фотоструму фотоприймача при опроміненні його світлом заданої потужності (забезпечується I_{CD}). Далі за допомогою калібровочної кривої спектральної характеристики фотодіода знаходимо для виміряного значення фотоструму відповідне значення λ_{\max} . Калібровочні криві спектральної залежності чутливості фотодіода, що використовується в даній роботі, для 3 груп СД (низької, середньої та високої потужності) наведені на рис.3.



a)



б)



в)

Рисунок 3 – Калібровочні криві спектральної характеристики фотодіода для світлодіодів: високої потужності (СД3, СД5, СД10) (а), середньої потужності (СД4, СД6, СД7, СД8, СД9) (б) та низької потужності (СД1, СД2) (в)

За допомогою Блоку 2 проводиться вимірювання ватт-амперних характеристик світлодіодів. Як видно з рис.1,б, Блок 2 містить 10 світлодіодів, які пронумеровані від 1 до 10. Кожний світлодіод міститься в закритому оптичному каналі для мінімізації втрат при передачі світла від джерела до приймача (від світлодіода до фотоприймача). У табл.3 наведено перелік використаних в Блоці 2 світлодіодів з їх основними паспортними даними. Послідовність СД у табл.3 та у Блоці 2 співпадає, оскільки на основі проведених вимірювань студенти мають познайомитись з різними світлодіодами з метою формування у них уявлення “матеріал СД – колір випромінювання СД”. Слід відмітити, що послідовність у розташуванні СД у Блоці 1 та Блоці 2 є різними.

Таблиця 3 – Перелік використаних СД у Блоці 2 з їх основними паспортними даними

№ п/п	Марка СД	Матеріал СД	λ_{max} , нм	Колір	$U_{\text{тип}}$, В	$I_{\text{мін}}$, мкА	$I_{\text{тип}}$, мкА	кут
1	GNL-3014UVC	InGaN	405	Фіолетовий	3	1600	2100	25°
2	GNL-3014UBC	InGaN	470	Синій	3.5	1200	2000	25°
3	HL-308U51GC	InGaN	510	Зелений	3.2	6370	8200	25°
4	GNL-3014UWC	InGaN	5500-7000K	Білий	3.5	2000	3000	25°
5	GNL-3014HD	GaP	700	Червоний	2.1	0,8	5	60°
6	L-934SYC	InGaAlP	595	Жовтий	2.0	280	700	50°
7	L-934SEC	InGaAlP	610	Оранжевий	2.0	480	1300	50°
8	GNL-3014URC	GaAlAs	660	Червоний	1.9	500	600	25°
9	SFH-487	GaAlAs	880	ІЧ	1.5	25 mW		20°
10	GNL-3014GD	GaP	565	Зелений	2.1	2,5	15	60°

Для проведення будь-яких вимірювань фотоприймач, що знаходиться у закритій капсулі (рис.2), розміщується у оптичний канал напроти відповідного світлодіода. У верхній частині капсули міститься сигнальний світлодіод зеленого кольору, який інформує про наявність електричного контакту у вимірювальній схемі. Капсули для Блоку 1 та Блоку 2 не є взаємозамінними.

Вимірювання ватт-амперних характеристик здійснюється за допомогою двох цифрових приладів: правий прилад " I_{CD}, mA " виводить на екран величину струму через світлодіод, а лівий прилад " P_{CD}, mW " – величину потужності випромінювання світлодіода. Ручкою " I_{CD} " в залежності від положення тумблера можна керувати струмом, що протікає через СД, в межах 2...6 мА чи 6...20 мА. Розміщені поряд сигнальні СД призначені для позначення обраного діапазону подачі струму через досліджуваний світлодіод.

Для вимірювання ватт-амперних характеристик світлодіодів слід за допомогою ручки " I_{CD} " подати на світлодіод струм, який відображається на правому вимірювальному приладі, та виміряти відповідну йому потужність випромінювання, що відображається на лівому вимірювальному приладі.

Порядок виконання роботи

1. Ввімкнути вимірювальний Блок 1.
2. Виміряти вольт-амперну характеристику заданих викладачем світлодіодів.
 - 2.1. Розмістити капсулу з фотоприймачем у закритий оптичний канал напроти заданого світлодіода.
 - 2.2. Перемикнути тумблер " I_{ϕ}/U_{CD} " у праве положення.
 - 2.3. За допомогою ручки " I_{CD}/U_{CD} " подати на світлодіод напругу. Крок вимірювання вибрати самостійно, однак не менше, ніж 10 точок на одній кривій.

- 2.4. Виміряти відповідний струм, що протікає через СД.
3. Виміряти величину фотоструму фотоприймача, що розташовується по черзі напроти заданих викладачем світлодіодів.
 - 3.1. Розмістити капсулу з фотоприймачем у закритий оптичний канал напроти заданого світлодіода.
 - 3.2. Перемикнути тумблер " I_{ϕ}/U_{CD} " у ліве положення.
 - 3.3. За допомогою ручки " I_{CD}/U_{CD} " виставити на світлодіоді величину струму через світлодіод, що задана у табл..2.
 - 3.4. Виміряти відповідний струм фотоприймача.
4. Вимкнути вимірювальний Блок 1.
5. Ввімкнути вимірювальний Блок 2.
6. Виміряти ватт-амперну характеристику заданих викладачем світлодіодів.
 - 6.1. Розмістити капсулу з фотоприймачем у закритий оптичний канал напроти заданого світлодіода.
 - 6.2. За допомогою ручки " I_{CD} " подати на світлодіод струм. Крок вимірювання вибрати самостійно, однак не менше, ніж 10 точок на одній кривій.
 - 6.3. Виміряти відповідну потужність випромінювання світлодіода.
7. Вимкнути Блок 2.

Обробка результатів

1. Побудувати суміщений графік ВАХ світлодіодів.
2. Визначити на основі ВАХ по описаній вище методиці довжину хвилі випромінювання світлодіодів.
3. Побудувати таблицю результатів вимірювання фотоструму фотоприймача для всіх досліджуваних світлодіодів.

4. Визначити на основі калібровочних кривих спектральної залежності чутливості фотоприймача довжину хвилі випромінювання світлодіодів.
5. Побудувати підсумкову таблицю по результатам визначення довжини хвилі випромінювання світлодіодів, визначених по двом методикам, в якій також навести паспортні дані світлодіодів з зазначенням їх марок.
6. Зробити висновок про точність кожного з двох методів визначення λ_{\max} .
7. Побудувати ватт-амперні характеристики світлодіодів.
8. Зробити висновок про зв'язок матеріалу, з якого виготовлений світлодіод, та колір його випромінювання.

Контрольні запитання

1. В чому полягає принцип дії світлодіода?
2. Що собою являє явище електролюмінесценції?
3. Чим визначається спектральний склад випромінювання світлодіода?
4. Які матеріали використовуються для виготовлення світлодіодів?
5. Перелічіть основні параметри та характеристики світлодіодів.
6. Чим обумовлена спостережувана люмінесценція у світлодіодах на основі непрямозонного матеріалу GaP?
7. Поясніть, яким чином можна керувати довжиною хвилі випромінювання у світлодіоді на основі GaAlAs?
8. Поясніть, яким чином можна керувати довжиною хвилі випромінювання у світлодіоді на основі InGaP?
9. Поясніть, яким чином можна керувати довжиною хвилі випромінювання у світлодіоді на основі InGaAlP?
10. Перелічіть матеріали, які використовуються для генерації УФ, ІЧ та видимого випромінювання.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

Дослідження характеристик фотоварікапів

Мета роботи – ознайомитись з принципом дії та різновидами фотоварікапів, набути практичних навичок у вимірюванні їх основних характеристик та розрахунку основних параметрів.

Теоретичні відомості

В основі роботи фотоварікапів лежить ефект зміни ємності структури під дією світла. Причиною зміни ємності є зменшення ширини області просторового заряду (ОПЗ) за рахунок збільшення кількості носіїв заряду при освітленні. Іншими словами фотоварікапи являють собою змінну під дією світла ємність. За будовою фотоварікапи поділяють на МДН фотоварікапи, гетероструктурні фотоварікапи та фотоварікапи на основі бар'єру Шотткі.

На сьогоднішній день варікапи і зокрема фотоварікапи використовуються як сенсори, електронні перемикачі та елементи пам'яті в різних галузях електроніки: сенсориці, біомедицині, оптоелектроніці, волоконно-оптичних системах передачі інформації тощо. Найкращі результати були одержані з використанням фоточутливих структур метал-діелектрик-напівпровідник. МДН фотоварікапи характеризуються великими значеннями вхідного опору, добротності, коефіцієнта перекриття по ємності, фоточутливості і працюють при будь-якій полярності напруги. На цих структурах створені матричні формувачі сигналів зображень, просторово-часові модулятори світла, перетворювачі та підсилювачі зображень.

МДН фотоварікапи конструктивно являють собою кремнієву підкладку, на якій нанесено діелектричну плівку, а також систему фронтальних та тильних

контактів. Однією з найважливіших структурних частин фотоварікапу є його діелектрична плівка. В якості високоомної плівки використовують оксид кремнію, сульфід кадмію, оксид церію, оксид лютетію, оксид ербію та оксид самарію. Основні вимоги до діелектричних плівок для використання їх в МДН фотоварікапах: висока електрична міцність ($E_{пр} > 10^6$ В/см), для досягнення якої діелектрична плівка не повинна містити наскрізних пор; велике значення відносної діелектричної проникності; висока прозорість в певній області спектру (в області фоточутливості структури) та стійкість до впливу оточуючого середовища. Крім того, в фоточутливих МДН приладах для підвищення відношення сигнал-шум необхідно зменшувати товщину шару діелектрика, не знижуючи електричної міцності.

В якості металевої обгортки МДН конденсатора використовуються електропровідні прозорі покриття (ЕПП), які повинні мати високу прозорість (коефіцієнт пропускання не менше 90%) та високу електропровідність (поверхневий опір не більше 100 Ом/квадрат), а також гарну адгезію до підкладки. Основна складність в технології виготовлення ЕПП – необхідність поєднання двох взаємовиключних властивостей твердого тіла: прозорості, яка властива діелектрикам та широкозонним напівпровідникам, і електропровідності, що характерна для матеріалів, що сильно поглинають світло (метали на напівпровідники). В якості ЕПП в МДН фотоварікапах використовуються тонкі оксидні плівки – SnO_2 , $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ (ITO), ZnO тощо.

Основною характеристикою варікапу і зокрема фотоварікапу є його вольт-фарадна характеристика (ВФХ), з якої визначаються його основні параметри: коефіцієнт перекриття по ємності в темновому режимі (K_t), коефіцієнт перекриття по ємності в світловому режимі ($K_{св}$), коефіцієнт фоточутливості ємності фотоварікапа (δC_f , %). Коефіцієнт перекриття по ємності як в темновому, так і світловому режимі визначається з експериментально вимірної ВФХ як відношення максимального значення ємності до мінімального:

$$K = \frac{C_{\max}}{C_{\min}} \quad (1)$$

Єдина відмінність між коефіцієнтами перекриття у темновому та світловому режимі полягає у тому, що данні по величинам ємності беруться з вольт-фарадних характеристик, виміряних у відповідних режимах.

Коефіцієнт фоточутливості ємності фотоварікапа визначається як відносна зміна ємності приладу за появи освітленості в області збіднення основними носіями заряду:

$$\delta C_{\phi} = \frac{C_{\text{ос}} - C_m}{C_m} \cdot 100\% = \frac{C_{\phi}}{C_m} \cdot 100\% \quad (2)$$

Слід зауважити, що максимальний приріст ємності МДН структури за появи освітлення спостерігається в області збіднення та інверсії, тому для розрахунку фоточутливості структури беруться значення ємності в даних областях з відповідних кривих ВФХ. При цьому додатково зазначається величина прикладеної напруги, частота тестового сигналу, а також рівень освітленості.

Типова вольт-фарадна характеристика МДН структури має вигляд плавної сходинок, як це показано на рис.1. Верхній рівень ємності на кривій (максимальна ємність структури, C_{\max}) відповідає режиму збагачення основними носіями заряду області просторового заряду напівпровідника і практично дорівнює ємності діелектрика (C_d):

$$C_{\max} = C_d = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_d}{d} \quad (3)$$

де ε_0 – діелектрична проникність вакууму, ε_d – відносна діелектрична проникність діелектричної плівки, d – товщина діелектричної плівки.

Нижній рівень ємності на кривій (мінімальна ємність структури, C_{\min}) відповідає режиму збіднення основними носіями заряду області просторового заряду напівпровідника і практично дорівнює ємності шару ОПЗ ($C_{\text{ОПЗ}}$):

$$C_{\min} = C_{\text{ОПЗ}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{ОПЗ}}}{l_{\text{ОПЗ}}} \quad (4)$$

де ε_0 – діелектрична проникність вакууму, $\varepsilon_{\text{ОПЗ}}$ – відносна діелектрична проникність шару ОПЗ, $l_{\text{ОПЗ}}$ – товщина шару ОПЗ.

Звідси видно, що фоточутливість варікапів підвищується при збільшенні коефіцієнта перекриття $K = \frac{C_{\max}}{C_{\min}} = \frac{C_{\text{Д}}}{C_{\text{ОПЗ}}}$, тобто при зменшенні товщини діелектрика.

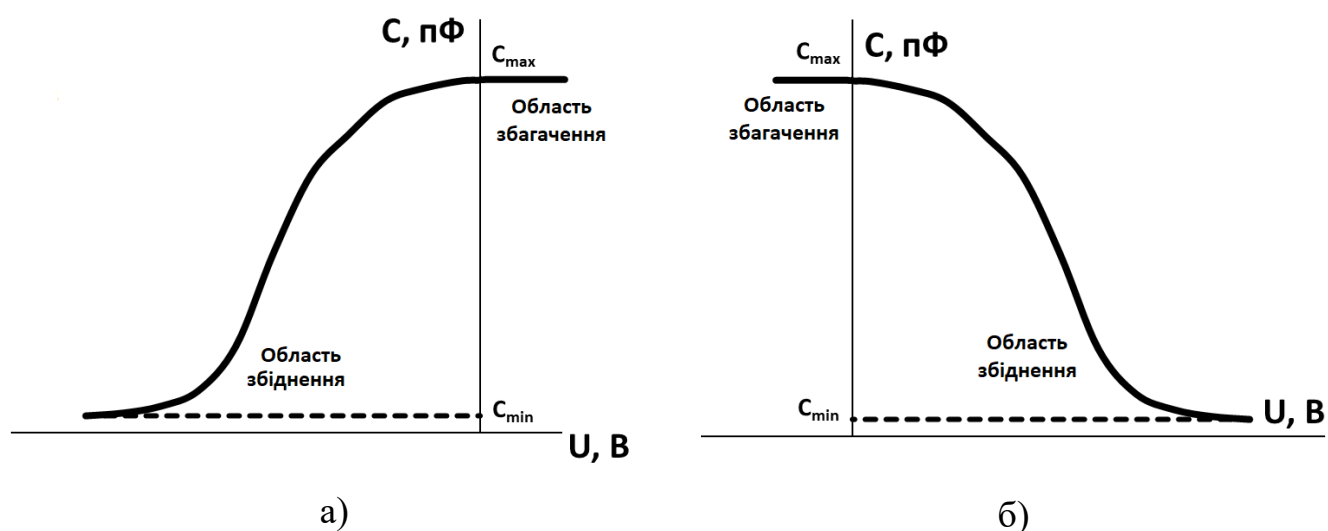


Рисунок 1 – ВЧ вольт-фарадна характеристика МДН структури, сформованої на поверхні напівпровідника n- (а) та р-типу (б) провідності

За видом ВФХ МДН структури легко можна встановити тип провідності напівпровідникової підкладки: для n-типу верхній рівень сходинок ВФХ знаходиться в області додатних напруг, а для р-типу – в області від’ємних напруг. Така закономірність впливає із фізики роботи МДН структури. Оскільки основними носіями заряду в напівпровіднику електронного типу провідності є електрони, то для формування області збагачення цими носіями заряду приповерхневої області МДН структури слід подати додатню напругу.

Для МДН структур, сформованих на підкладках р-типу провідності можна провести аналогічні міркування.

Основні параметри фоточутливих МДН приладів залежать від електрофізичних властивостей межі поділу діелектрик-напівпровідник. Це обумовлено наявністю пасток-станів на межі поділу діелектрик-напівпровідник (швидкі стани) та в об'ємі діелектрика (повільні стани), які захоплюють вільні носії заряду. Повільні стани чутливі до впливу оточуючого середовища (волога, температура), а швидкі стани – до якості обробки поверхні напівпровідника, типу діелектрика та способу його нанесення. Критерієм одержання межі поділу діелектрик-напівпровідник високої якості є мінімізація густини поверхневих станів до $10^{10} \dots 10^{11} \text{ см}^{-2}$. З точки зору можливості створення досконалої межі поділу найбільш перспективним є одержання SiO_2 на поверхні кремнію методом його термічного окислення. При цьому густина поверхневих станів може бути меншою, аніж 10^{10} см^{-2} . Суттєвим недоліком використання оксиду кремнію в МДН структурах є відносно висока проникність шару по відношенню до ряду іонів, зокрема лужних, а також невисокі значення відносної діелектричної проникності. Все це зумовлює пошук нових діелектричних плівкових матеріалів для синтезу МДН варікапів, зокрема досить перспективними є нові розробки по тонкоплівковим оксидам рідкісноземельних металів.

В загальному випадку ємність ідеальної МДН-структури подається у вигляді послідовного з'єднання ємності діелектрика (C_d) та ємності ОПЗ напівпровідника ($C_{опз}$) (рис.2, а). Звідси повна ємність ідеальної МДН структури ($C_{ид}$) визначається наступним чином:

$$\frac{1}{C_{ид}} = \frac{1}{C_d} + \frac{1}{C_{опз}} \quad (5)$$

або

$$C_{ид} = \frac{C_d \cdot C_{опз}}{C_d + C_{опз}} \quad (6)$$

Еквівалентна схема реальної МДН структури додатково містить ємність поверхневих станів ($C_{\text{пс}}$), що вмикається паралельно з ємністю ОПЗ напівпровідника (рис.2, б). Звідси повна ємність реальної МДН структури ($C_{\text{реал}}$) визначається наступним чином:

$$\frac{1}{C_{\text{реал}}} = \frac{1}{C_{\text{д}}} + \frac{1}{C_{\text{ОПЗ}} + C_{\text{пс}}} \quad (7)$$

Ємність діелектрика від величини прикладеної напруги не залежить, а ємність шару ОПЗ напівпровідника та ємність поверхневих станів – залежить. Тому вигляд ВФХ визначається саме залежністю $C_{\text{ОПЗ}}$ та $C_{\text{пс}}$ від прикладеної напруги.

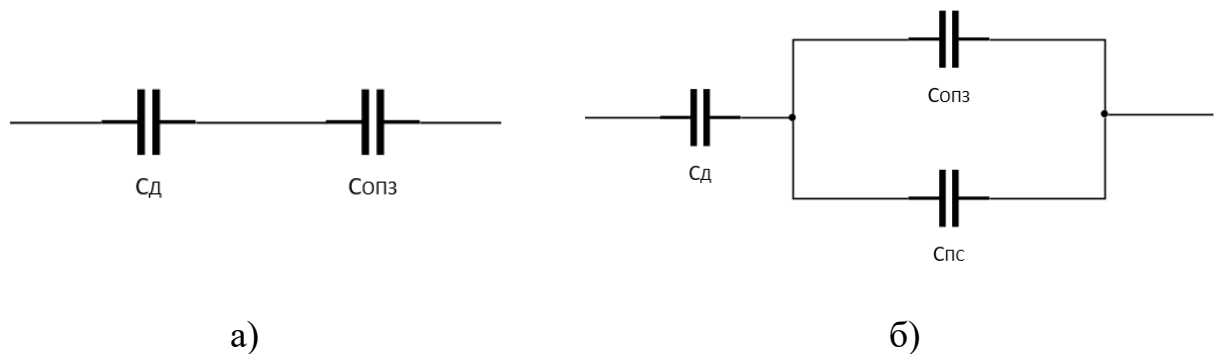


Рисунок 2 – Еквівалентна схема ідеальної (а) та реальної (б) МДН структури

В області збагачення основними носіями заряду МДН структура може бути представлена у вигляді плоского конденсатора, обгортками якого виступають металевий електрод та збагачена основними носіями заряду приповерхнева область напівпровідника, а наповнювачем – високоомна плівка (діелектрик). Звідси може бути встановлений зв'язок ємності МДН структури з відносною діелектричною проникністю діелектрика та геометрією контактів:

$$C = \frac{\varepsilon_{\text{д}} \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}, \quad (8)$$

де $\varepsilon_{\text{д}}$ – відносна діелектрична проникність діелектрика; ε_0 – електрична стала; S – площа обгортки конденсатора; d – товщина діелектрика. З цієї залежності може бути визначена величина відносної діелектричної проникності

діелектричної плівки або її товщина. Значення ємності МДН структури визначається з виміряної ВФХ в області збагачення основними носіями заряду.

На основі виміряної вольт-фарадної характеристики можна встановити рівень легування напівпровідника. При цьому можна виділити декілька способів: метод мінімальної ємності ВЧ ВФХ, метод вимірювання ємності плоских зон, метод визначення нахилу ВФХ. Одним з найпростіших методів є метод мінімальної ємності ВЧ ВФХ, який використовується експресної оцінки рівня легування. Даний метод ґрунтується на вимірюванні ВЧ вольт-фарадної характеристики та визначенні з неї мінімальної величини нормалізованої ємності $\left(\frac{C_{\min(\text{експ})}}{C_D}\right)$, яка надалі прирівнюється відповідному теоретичному значенню:

$$\frac{C_{\min(\text{експ})}}{C_D} = \left(\frac{\varepsilon_D}{\varepsilon_{nn} d} \sqrt{\frac{4\varepsilon_0 \varepsilon_{nn} kT \ln \frac{N_A}{n_i}}{q^2 N_A}} + 1 \right)^{-1} \quad (9)$$

де ε_{nn} - відносна діелектрична проникність напівпровідника, N_A - концентрація акцепторів, n_i - концентрація власних носіїв заряду, k – стала Больцмана, T – температура, q – елементарний заряд. Слід зауважити, що дана формула записана для напівпровідника р-типу провідності. Для напівпровідника n-типу провідності вираз є таким самим з тією відмінністю, що замість концентрації акцепторів у вираз входить концентрація донорів.

За формулою (9) були побудовані графічні залежності мінімальної величини нормалізованої ємності від товщини діелектрика за різних концентрацій домішок в напівпровіднику для системи Si-SiO₂ (рис.3). З наведених графіків, знаючи товщину діелектрика, можна встановити рівень легування напівпровідника.

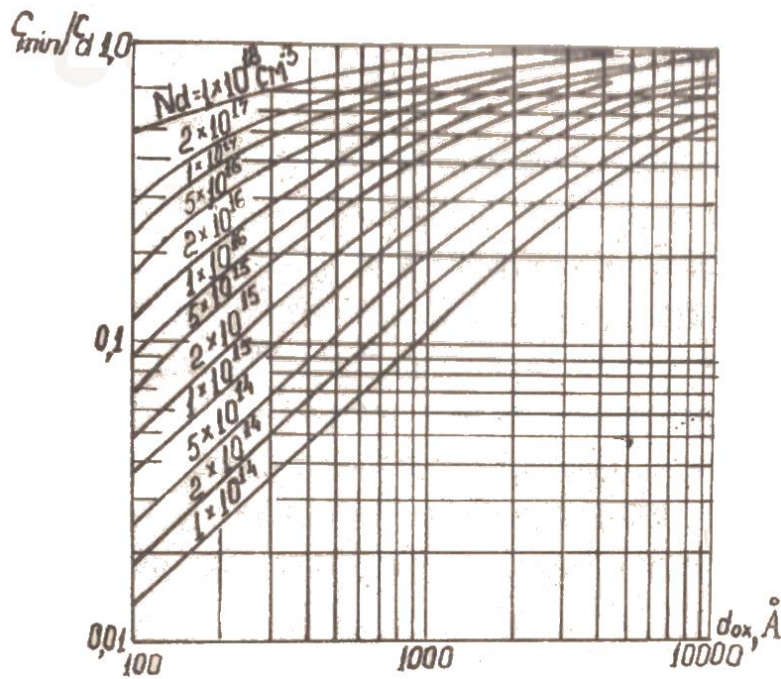


Рисунок 3 – Залежність мінімальної величини нормалізованої ємності від товщини діелектрика за різних концентрацій домішок в напівпровіднику для системи Si-SiO₂

Для синтезу МДН фотоварікапів підвищеної фоточутливості під час розробки їх технології виготовлення слід проводити кількісний аналіз межі поділу плівка-підкладка. В загальному випадку класифікація складових зарядового стану системи плівка – підкладка виглядає наступним чином:

- 1) заряд, локалізований в діелектричній плівці (фіксований (іони кремнію) чи рухомий (іони лужних металів));
- 2) поверхневі стани, розташовані на межі поділу плівка – підкладка (швидкі стани);
- 3) стани в плівці та на її поверхні (повільні стани).

Критерієм розмежування вкладів від кожної із цих складових у вольт-фарадну характеристику є частота тестової напруги. Відомо, що зменшення ємності МДН структури при зростанні частоти тестового сигналу пов'язане з тим, що заряд на поверхневих станах не встигає слідувати за змінами напруги.

Так, час релаксації повільних станів становить від 10^{-3} с до декількох хвилин, а це означає, що, починаючи з частоти 1 кГц повільні стани не встигатимуть перезаряджатись і відповідно не впливатимуть на ємність структури. Час релаксації швидких станів в загальному випадку знаходиться в межах $10^{-4} - 10^{-7}$ с, тобто в частотному діапазоні 10 кГц – 10 МГц ці стани встигатимуть за тестовим сигналом. А за частоти, більшої ніж 10 МГц, залишається вклад лише від зарядів плівки.

Отже, аналізуючи виміряні ВФХ на певних частотах, можна оцінити кількість (концентрацію) відповідних структурних дефектів у складі МДН структури.

По зсуву ВЧ вольт-фарадних характеристик вздовж осі напруг без зміни їх форми оцінюють величину заряду, локалізованого в плівці. Причому знак цього заряду – додатній. Для МДН структур спостерігається частотна залежність ВФХ в області збагачення, що може бути пояснена частотною дисперсією діелектричної проникності плівки. Крім того, зміна нахилу ВФХ відносно осі напруг в області збіднення зазвичай пов'язується зі зміною густини поверхневих станів на межі поділу. Наявність на межі поділу діелектрик – напівпровідник поверхневих станів не змінює ВЧ-ємність МДН-структури. Однак ці стани встигають перезаряджатись під дією напруги зміщення, що змінюється повільно. Поява додаткової зміни заряду на межі поділу плівка – підкладка викликає зростання заряду на металевому електроді для того, щоб забезпечити той самий поверхневий потенціал. Тому по формі ВЧ ВФХ можна визначити густину поверхневих станів.

Опис вимірювального стенду та методика проведення вимірювань

Вимірювальний стенд вольт-фарадних характеристик (ВФХ) фотоварікапів складається з вимірювача добротності ВМ 650, джерела напруги змінної полярності

Б1-7, цифрового вольтметра В7-16А та світлодіодного джерела світла. Схема вимірювального стенду зображена на рис. 4, а. В даній схемі U – джерело напруги, ДС – джерело світла, V – вольтметр. Вимірювання ємності здійснюється за допомогою вимірювача добротності ВМ 650, до складу якого входять наступні складові: генератор частоти, C_k – змінна ємність вимірювального контуру та L_k – індуктивність вимірювального контуру, які забезпечують можливість вимірювання ємності зразків. $L_{др}$ – дросель, необхідний для зменшення вклату опорів компонентів контуру, $C_{бл}$ – блокуюча ємність, необхідна для зниження впливу інших приладів на вимірювальну установку, і яка забезпечує повторюваність результатів, $R_{об}$ – обмежувальний резистор, що використовується для збереження цілісності зразків, обмежуючи електричний струм.

Структура досліджуваного фотоварікапа наведена на рис.4, б. Лабораторний зразок являє собою МДН структуру типу $Si/SiO_2/Ti/Ni$. Вимірювання ВФХ в даній лабораторній роботі здійснюється за різних частот тестового сигналу (50 кГц – 2,5 МГц) та різних потужностей світлового потоку, який падає на фотоварікап ($0 - 2000 \text{ Вт/м}^2$).

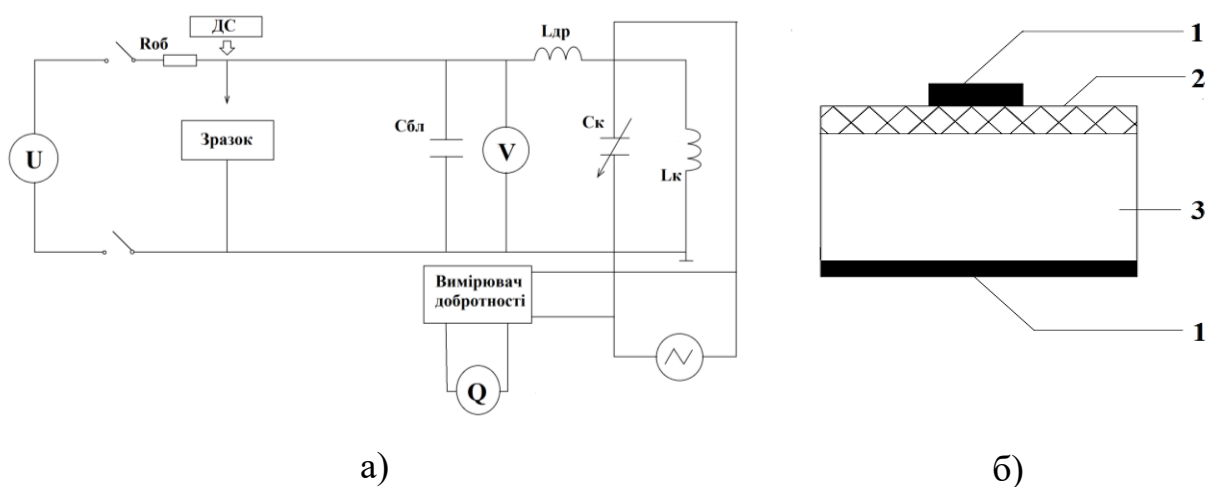


Рисунок 4 – Схема вимірювання ВФХ (а) та структура фотоварікапа (б):
1 – металеві контакти $Ti - Ni$, 2 – плівка SiO_2 , 3 – кремнієва підкладка

Частота тестового сигналу встановлюється за допомогою з'ємної котушки індуктивності, яку обирають з комплекту 12 котушок різної індуктивності (табл..1). Номер котушки індуктивності вказано зверху на її корпусі. Далі за допомогою відповідного перемикача частотних піддіапазонів та ручки налаштування частоти “Частота” на генераторі добротності виставляється задана викладачем частота тестового сигналу для вимірювання ВФХ.

Таблиця 1 – Технічні данні комплекту котушок індуктивності

Номер котушки	Індуктивність котушки	Діапазон частот
1	30 мГн	50 – 80 кГц
2	12 мГн	80 – 140 кГц
3	4,3 мГн	140 -240 кГц
4	1,15 мГн	240 – 440 кГц
5	330 мкГн	440 – 750 кГц
6	120 мкГн	0,75 – 1,3 МГц
7	40 мкГн	1,3 – 3 МГц
8	13,5 мкГн	3 – 5 МГц
9	6,5 мкГн	5 – 8 МГц
10	1,6 мкГн	8 – 14 МГц
11	1 мкГн	14 – 24 МГц
12	0,55 мкГн	24 – 35 МГц

Методика проведення вимірювань ємності зразку за допомогою вимірювача добротності ВМ 650 полягає в наступному.

1. Вибрати частоту вимірювання ємності.
2. Налаштувати вимірювальний контур в резонанс і записати виміряне значення його ємності C_1 (без досліджуваного зразку).
3. На робочому столику розмістити експериментальний зразок.

4. Налаштувати вимірювальний контур в резонанс і записати виміряне значення ємності C_2 (з досліджуваним зразком).
5. Ємність досліджуваного зразку визначається за формулою:

$$C_x = C_1 - C_2 \quad (10)$$

Якщо резонанс не вдається знайти, то це означає, що ємність під'єданого зразку є вищою, аніж ємність вимірювального контура C_1 . В такому випадку для знаходження резонансу слід обрати іншу частоту або навіть інший частотний діапазон (шляхом вибору іншої котушки індуктивності), на якій слід встановити резонанс за достатньо великого значення ємності C_1 . Далі повторити п.п. 3–5.

Налаштування контура в резонанс здійснюється за допомогою ручки “Ємність”, яку слід обертати до тих пір, доки на шкалі Q стрілка приладу після поступового відхилення вправо різко відхилиться вліво (точка резонансу). Якщо під час пошуку резонансу стрілка виходить за межі шкали, слід обрати інший діапазон вимірювання Q . По шкалі Q передбачено 4 діапазони – 30, 100, 300, 1000. Шляхом натискання відповідного перемикача можна розширити діапазон шкали по Q . Починати пошук резонансу слід зі шкали 30. Значення ємності при цьому записується по ноніусній шкалі “Ємність, пФ”.

Вимірювання ВФХ полягає у встановленні залежності ємності зразку від прикладеної напруги. Тобто за кожного наступного значення прикладеної напруги слід налаштовувати контур в резонанс і записувати при цьому нове значення C_2 . Напруга на зразок подається за допомогою джерела напруги Б1-7, а її значення вимірюється цифровим вольтметром В7-16А. При цьому на вольтметрі слід перейти у відповідний режим вимірювання за допомогою тумблери “U/E” (в даному випадку режим U – режим вимірювання напруги) і вибрати межу вимірювання “10”.

Режим освітлення фотоварікапу задається рівнем струму через світлодіодний освітлювач, що розміщується з внутрішньої сторони світлового екрану. Для встановлення заданого рівня потужності світла, що потрапляє на

фотоарікап, перш за все, слід перейти у відповідний режим вимірювання цифрового вольтметра В7-16А за допомогою тумблеру “U/E” (в даному випадку режим E – режим вимірювання рівня освітленості), далі перейти на межу вимірювання “1” і виставити кількість поділок, що відповідають заданому рівню потужності світлодіодного освітлювача. Калібрування джерела світла здійснювалось за допомогою вимірювача потужності сонячного спектру Ezodo-45. Дані калібрування наведені у табл.2. При відсутності струму через світлодіодний освітлювач забезпечується темновий режим вимірювання.

Таблиця 2 – Відповідність між струмом через світлодіодний освітлювач та потужністю його світлового потоку

Кількість поділок на межі вимірювання “1”	230	180	140	100	50	20	10
Потужність світлового потоку, Вт/м ²	1750	1400	1050	740	375	150	80

Порядок виконання роботи

1. Ввімкнути вимірювач добротності ВМ 650 за допомогою тумблера живлення.
2. Здійснити калібрування вимірювача добротності ВМ 650 шляхом натискання кнопки “Калібровка”. Якщо стрілка на шкалі Q знаходиться навпроти червоного прапорця, прилад відкалібрований. У протилежному випадку за допомогою ручки “Калібровка” виставляємо стрілку у дане положення.
3. Виставити частоту, на якій проводитимуться вимірювання вольт-фарадних характеристик.

3.1. Обрати котушку з табл.1. з заданим частотним діапазоном і встановити її у клемах, що розташовані на верхній панелі вимірювача добротності ВМ 650.

3.2. Натиснути перемикач обраного частотного піддіапазону на передній панелі вимірювача добротності ВМ 650, а за допомогою ручки налаштування частоти “Частота” на генераторі добротності виставляється задана викладачем частота тестового сигналу для вимірювання ВФХ.

4. Налаштувати вимірювальний контур в резонанс.

4.1. На робочому столику під вимірювальний зонд поміщається діелектрична пластинка.

4.2. За допомогою ручки “Ємність” підбирається ємність стенду так, щоб спостерігався резонанс, тобто ручку слід обертати до тих пір, доки на шкалі Q стрілка приладу після поступового відхилення вправо різко відхилиться вліво.

4.3. Значення ємності стенда (C_1) визначається по ноніусній шкалі “Ємність, пФ”.

5. Налаштувати вимірювальний контур та дослідний зразок в резонанс.

5.1. На робочому столику під вимірювальний зонд поміщається дослідний зразок. Зонд слід розмістити на контактному майданчику фотоварікапа.

5.2. За допомогою ручки “Ємність” підбирається ємність стенду зі зразком так, щоб спостерігався резонанс, тобто ручку слід обертати до тих пір, доки на шкалі Q стрілка приладу після поступового відхилення вправо різко відхилиться вліво.

5.3. Значення ємності стенду зі зразком (C_2) визначається по ноніусній шкалі “Ємність, пФ”. Слід зауважити, що це значення ємності було зняте за відсутності напруги на зразку.

6. Ввімкнути джерело напруги Б1-7 та цифровий вольтметр В7-16А за допомогою їх тумблерів живлення.

7. Задати на джерелі напруги Б1-7 полярність прикладеної напруги шляхом розміщення виводів у такому порядку: сірий вивід на “-” – від’ємна полярність, сірий вивід на “+” – додатня полярність.

8. Виміряти вольт-фарадну характеристику зразку за даної частоти в темновому режимі.

8.1. Виставити на джерелі напруги Б1-7 перше значення напруги за допомогою двох ручок “Напруга” – “Грубо” та “Точно”. При цьому саме значення напруги вимірюється цифровим вольтметром В7-16А (за допомогою тумблеру “U/E” вибрати режим U – режим вимірювання напруги і вибрати межу вимірювання “10”).

8.2. Виміряти ємність C_2 як у пункті 5.2 – 5.3.

8.3. Змінити значення прикладеної напруги і знову виміряти ємність C_2 як у пункті 8.1 – 8.2. Діапазон та крок зміни прикладеної напруги задається викладачем.

8.4. Змінити полярність прикладеної напруги та провести аналогічні вимірювання (п.н.8.1-8.3).

9. Виміряти вольт-фарадну характеристику зразку за даної частоти в режимі освітлення.

9.1. Ввімкнути світлодіодний освітлювач та виставити на ньому заданий викладачем рівень освітленості зразку. Для цього на цифровому вольтметрі В7-16А за допомогою тумблеру “U/E” вибрати режим E – режим вимірювання рівня освітленості, далі перейти на межу вимірювання “1” і виставити кількість поділок, що відповідають заданому рівню потужності світлодіодного освітлювача. Відповідність між струмом через світлодіодний освітлювач та потужністю його світлового потоку наведена у табл..2.

9.2. Виміряти ВФХ за даного рівня освітленості та частоти, повторивши пункти 8.1-8.4.

9.3. Повторити вимірювання п.н. 9.1-9.2 за вищого рівня освітленості.

10. Змінити частоту тестового сигналу і провести аналогічні вимірювання ВФХ за трьох рівнів освітленості (пункти 3 – 9).

11. Зняти залежність ємності МДН фотovarікапа від величини потужності світла, що задається у табл..2, за даної частоти тестового сигналу та напруги на зразку.

Обробка результатів

1. На основі вимірянних значень C_1 та C_2 розрахувати істинне значення ємності досліджуваного зразку за формулою (10).

2. Побудувати сімейство ВФХ за різних рівнів освітленості для 2 частот тестового сигналу.

3. Розрахувати основні параметри фотovarікапів: коефіцієнт перекриття по ємності в темновому режимі (K_t), коефіцієнт перекриття по ємності в світловому режимі ($K_{св}$), коефіцієнт фоточутливості ємності фотovarікапа (δC_f , %) за формулами (1 – 2).

4. Побудувати суміщений графік ВФХ на двох частотах в темновому режимі та за максимального рівня освітленості.

5. Встановити тип провідності та рівень легування напівпровідника МДН структури.

6. Розрахувати діелектричну проникність плівки оксиду кремнію за формулою (8).

7. Побудувати залежність ємності МДН фотovarікапа від величини потужності світла за даної частоти тестового сигналу та напруги на зразку.

8. Зробити висновок про вплив частоти тестового сигналу та величини освітленості зразку на ємність МДН структури.

Контрольні запитання

1. В чому полягає принцип дії фотоварікапів? Назвіть структурні різновидності цих приладів.
2. Якою є будова МДН фотоварікапу? Назвіть матеріали, що використовуються для його виготовлення.
3. Порівняйте різні матеріали, які використовуються для виготовлення діелектричної плівки МДН фотоварікапів.
4. Перелічіть основні вимоги, які висуваються до діелектричних матеріалів для побудових високочутливих МДН фотоварікапів.
5. Перелічіть основні вимоги, які висуваються до металевих контактів для побудових високочутливих МДН фотоварікапів.
6. Перелічіть основні параметри фотоварікапів та вкажіть формули для їх розрахунку.
7. Намалюйте ВФХ для напівпровідників різного типу провідності з позначенням областей інверсії, збіднення та збагачення основними носіями заряду приповерхневої області напівпровідника.
8. Якою є еквівалентна схема ідеального та реального МДН варікапу? Запишіть вирази для повної ємності МДН структури для обох випадків.
9. Яким чином за допомогою вимірювання ВФХ можна визначити відносну діелектричну проникність матеріалу?
10. Яким чином за допомогою вимірювання ВФХ можна встановити рівень легування напівпровідника?
11. Розкажіть про класифікацію зарядового стану системи Si-SiO₂ та критерій їх розмежування.
12. Яким чином за допомогою вимірювання ВФХ можна оцінити досконалість межі поділу плівка-підкладка в МДН структурах?
13. Перелічіть області використання фотоварікапів.
14. Яким чином визначається експериментально та теоретично максимальна та мінімальна ємність МДН структури?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

Дослідження оптичних характеристик тонких плівок

Мета роботи – ознайомитись з принципом дії спектрофотометра та набути практичних навичок у вимірюванні за його допомогою оптичних характеристик тонких плівок.

Теоретичні відомості

Прозорі та напівпрозорі тонкі плівки широко використовуються в різноманітних приладах оптоелектроніки та сенсорики: світлодіодах, фотоприймачах, сонячних елементах, сенсорах фізичних та хімічних величин, рідкокристалічних дисплеях та плазмових панелях, мобільних телефонах тощо. До найбільш поширених матеріалів прозорих тонких плівок слід віднести наступні: SiO_2 , Al_2O_3 , $\text{In}_2\text{O}_3\cdot\text{Sn}$ (ITO), MoO_3 , ZnO , SnO_2 , TiO_2 , CuAlO_2 . Деякі з цих матеріалів є діелектриками, а деякі відносяться до напівпровідників, однак всі вони належать до так званих оксидних матеріалів. Слід відмітити, що оксидні матеріали становлять один із основних напрямків прозорої електроніки.

Оптичні властивості прозорих матеріалів є результатом взаємодії речовини з електромагнітним випромінюванням. Вивчення оптичного діапазону охоплює наступні довжини хвиль: від 180 до 380 нм – ультрафіолетова область, від 380 до 780 нм – видима частина спектру, від 780 до 50000 нм – ІЧ область.

Зрозуміло, що спектр прозорості матеріалів залежить від ширини забороненої зони, товщини плівки, наявності в ній забруднень або домішок, що здатні сильно поглинати світло, кількості нанесених шарів та їх послідовності, показника заломлення матеріалу тощо.

Основними параметрами прозорих тонких плівок є коефіцієнт пропускання та оптична густина, які можуть бути визначені за допомогою спектрофотометра.

Коефіцієнт пропускання (прозорості, T) показує, яка частина світлового потоку, що падає на досліджуваний об'єкт (Φ_0), проходить через нього не поглинаючись (Φ):

$$T = \frac{\Phi}{\Phi_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

Оптична густина D речовини характеризує ступінь поглинання нею монохроматичного випромінювання і описується співвідношенням:

$$D = \lg \frac{1}{T} \cdot 100\% . \quad (2)$$

Слід відмітити, що обидві величини сильно залежать від довжини хвилі, тому вимірюється спектральна залежність прозорості та оптичної густини. Якщо ж вказується дискретне значення коефіцієнту пропускання чи оптичної густини, то поряд зазначається довжина хвилі, на якій вони були визначені. З прикладної точки зору, спектральні залежності слід будувати не від довжини хвилі, а від енергії кванта світла даної довжини. Перехід до енергії кванту світла (E) від його довжини хвилі (λ) можна здійснити на основі закону Планка:

$$E = h\nu \quad (3)$$

та відомого співвідношення між частотою (ν) та довжиною хвилі (λ)

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (4)$$

де h – стала Планка, c – швидкість світла.

Для всіх речовин умова прозорості виражається наступним співвідношенням:

$$\frac{hc}{\lambda} < \Delta E_g \quad (5)$$

де ΔE_g – ширина забороненої зони матеріалу. Іншими словами, енергія кванту світла, що падає на матеріал, повинна бути меншою, аніж його ширина забороненої зони. Знаючи ширину забороненої зони матеріалу, можна розрахувати значення граничної довжини хвилі $\lambda_{\text{гр}}$, яке показує, з яких значень

довжин хвиль матеріал буде прозорим, а за яких – непрозорим по відношенню до падаючого світла. Так, за довжин хвиль $\lambda > \lambda_{\text{гр}}$ речовина є прозорою, а за довжин хвиль $\lambda < \lambda_{\text{гр}}$ речовина є непрозорою. Високою прозорістю у видимій частині спектру характеризуються різні види скла та оксидні матеріали на основі SiO_2 , Al_2O_3 , B_2O_3 , P_2O_5 .

Значення $\lambda_{\text{гр}}$ можна експериментально визначити зі спектральної кривої пропускання. Прийнято вважати, що $\lambda_{\text{гр}}$ відповідає пропусканню речовини 50% випромінювання. Знаючи граничну довжину хвилі, можна оцінити величину ширини забороненої зони матеріалу, тобто розв'язати зворотну задачу.

Досить часто в електроніці використовуються багат шарові структури тонких плівок. При цьому спостерігаються різноманітні ефекти, зокрема “ефект просвітлення оптики”, який полягає у зменшенні відбивання світла від поверхні, тому таке покриття інколи ще називають антивідбивальне покриття. Такі покриття широко використовуються при створенні сонячних елементів. Підбір антивідбивального покриття здійснюється на основі показника заломлення. Умова практично нульового відбивання має наступний вигляд:

$$n_1 = \sqrt{n_0 \cdot n_2} \quad (6)$$

де n_0 , n_1 , n_2 – показники заломлення повітря, просвітляючої плівки та нижнього шару (підкладки), тобто того матеріалу, поглинання якого ми хочемо збільшити. В будь-якому разі показник заломлення верхнього шару має бути меншим, ніж показник заломлення нижнього шару. Наприклад, показник заломлення монокристалічного кремнію, який широко використовується для виготовлення сонячних елементів, має показник заломлення 3,8, а тому просвітляючи покриття має мати цей показник на рівні 1,9. Такий показник має плівка Si_3N_4 . Не менш важливим є правильний вибір товщини просвітляючого покриття. Так, товщина антивідбивальної плівки обирається так, щоб довжина хвилі в цій

плівці була рівна $\frac{1}{4}$ довжини хвилі у вільному просторі. Цю умову можна виразити таким співвідношенням:

$$d_1 = \frac{\lambda_0}{4n_1} \quad (7)$$

Визначається товщина антивідбивального покриття для сонячних елементів на довжині хвилі 600 нм, що відповідає максимальній інтенсивності сонячного світла. У випадку монокристалічного кремнію товщина плівки Si_3N_4 має бути близько 80 нм.

Опис вимірювального стенду та методика проведення вимірювань

Для дослідження оптичних характеристик тонких плівок в лабораторній роботі використовується двопроменевий спектрофотометр UNICO 4802 UV / VIS, який призначений для вимірювання спектрів пропускання прозорих та напівпрозорих тонких плівок у спектральному діапазоні довжин хвиль 190 – 1100 нм. В якості джерела світла в спектрофотометрі використовуються дві лампи – вольфрамова галогенова лампа та дейтерієва лампа. Джерелом видимого світла є вольфрамова лампа, що випромінює постійний потік світла в діапазоні 380 – 950 нм. В якості джерела УФ використовуються дейтерієві лампи, які дають неперервний спектр в діапазоні 200 – 360 нм. На передній панелі спектрофотометра міститься рідкокристалічний дисплей для виводу спектрів пропускання на екран та система керування роботою спектрофотометра, яка містить кнопки, вказані у табл.1.

Методика проведення дослідження оптичних спектрів пропускання тонких плівок за допомогою спектрофотометра складається з 3 етапів: підготовка спектрофотометра до вимірювання (прогрів, калібрування тощо), вибір режиму роботи та налаштування параметрів робочої області спектру, проведення сканування зразку світлом та зняття спектрів пропускання.

Таблиця 1– Опис системи керування спектрофотометром

Назва кнопки керування	Призначення кнопки керування
F1	Вибір діапазону, кроку та швидкості сканування спектру по довжинам хвиль
F2	Вибір одиниць вимірювання по осях області побудови спектру
F3	Вимірювання спектру пропускання по точках в ручному режимі
PRINT	Друк спектру прозорості на паперовому носії
SET λ	Встановлення довжини хвилі, на якій визначається прозорість зразку
<u>0</u>Abs 100%T	Швидкий вибір одиниць вимірювання по осі прозорості
ENTER	Підтвердження вибору режиму, параметрів сканування тощо
LOAD	Виведення на екран попередньо збереженого графіку з оперативної пам'яті спектрофотометра
SAVE	Збереження графіку в оперативній пам'яті спектрофотометра
START	Запуск процесу сканування спектру пропускання
<u>ESC</u> STOP	Повернення з будь-якого обраного режиму у вихідний/попередній стан
CLEAR	Видалення графіка з області побудови
CELL	Керування курсором Вниз-Вверх-Вліво-Вправо по робочому дисплею
0 – 9 /ABC	Клавіатура для введення цифрової та текстової інформації

Головне меню спектрофотометра (Spectro Quest), яке завантажується на робочий дисплей автоматично після прогріву приладу, містить 8 розділів:

1. Basic mode (Основний режим) – визначення абсорбції, поглинання, концентрації речовини.
2. Quantative (Кількісні вимірювання) – запис та використання занесених в пам'ять даних по калібровці для вимірювання невідомих концентрацій речовини.
3. WL scan (Режим сканування) – сканування спектру пропускання речовини у вибраному спектральному діапазоні із вибором швидкості сканування.
4. Kinetics (Кінетика) – Вимірювання зміни абсорбції з часом.
5. DNA/Protein (ДНК/Білки) – Розрахунок концентрації та чистоти ДНК, концентрації білків.
6. Multi WL (Багатохвильовий режим) – Вимірювання абсорбції на багатьох довжинах хвиль, що використовується для аналізу та визначення складу сумішей.
7. Utility (Сервісні програми) – Допоміжні програми та інструменти – встановлення темного струму, довжини хвилі лампи, таймера, звукового сигналу тощо.
8. Defined test (Задані програми) – Відкрита платформа для обраних користувачем програм.

Для вимірювання спектрів прозорості тонкі плівки наносять на прозорі підкладки (як правило, скляні) і розташовують у кюветі приладу (відсік, що знаходиться ліворуч). Зразок має бути розміщений навпроти отвору, через який проходить світло. Кріплення зразку здійснюється за допомогою двохсторонньої клейкої стрічки. Для дослідження в роботі передбачено вимірювання наступних зразків: скло, скло/ SiO_2 , скло/ Al_2O_3 , скло/ITO, скло/ MoO_3 , скло/ SiO_2 /ITO, скло/ α -Si, скло/ α -Si/ITO. У табл.2 наведено величину ширини забороненої зони та показника заломлення даних матеріалів.

Таблиця 2 – Параметри тонких плівок, що використовуються в даній лабораторній роботі

Назва матеріалу	ΔE_g , eV	n
SiO ₂	8	1,45
Al ₂ O ₃	6,5	3,2
In ₂ O ₃ :Sn	4	2
MoO ₃	3,5	2
α -Si	1,6	2,5

Порядок виконання роботи

1. Ввімкнути спектрофотометр за допомогою перемикача на тильній панелі приладу.
2. Звільнити кювету для встановлення зразків.
3. Здійснити калібрування та форматування приладу. Процес налаштування приладу здійснюється в напіваавтоматичному режимі, тобто для запуску чергової операції по налаштуванню потрібно натиснути кнопку “Enter” на передній панелі управління. Процес налаштування закінчується прогрівом лампи спектрофотометра на протязі 15 хв. Коли спектрофотометр готовий до роботи, на робочому дисплеї з’являється головне меню (Spectro Quest) і звучить звуковий сигнал.
4. В головному меню вибрати режим Сервісних програм (Utility) за допомогою кнопки “7” на передній панелі керування. Відімкнути звучання звукового сигналу шляхом натискання кнопки “9”. Повторне натискання цієї кнопки призведе до ввімкнення звукового сигналу. Для того, щоб повернутись у головне меню слід натиснути кнопку “Esc”.
5. В головному меню вибрати режим сканування дослідного зразку (WL Scan). Для цього потрібно натиснути кнопку “3” на передній панелі управління.

6. Перед скануванням необхідно налаштувати параметри робочої області спектру, а саме: потрібно вибрати одиниці вимірювання та діапазон вимірювання вздовж осі абсцис та ординат. Для вибору діапазону вимірювання вздовж осі абсцис слід спочатку наистиннути кнопку “F1” на передній панелі управління, а далі за допомогою кнопок зі стрілками “Вниз-Вверх-Вліво-Вправо” обрати діапазон, крок та швидкість сканування спектру по довжині хвилі. Вибір кожної величини потрібно підтверджувати шляхом натискання кнопки “Enter” у разі згоди із автоматично запропонованими величинами або встановити їх в ручному режимі за допомогою кнопок з цифрами, що розташовані на передній панелі управління, та кнопки “Enter”.

7. Для вибору одиниць вимірювання вздовж осі ординат слід спочатку наистиннути кнопку “F2” на передній панелі управління, а далі за допомогою кнопок зі стрілками “Вниз-Вверх-Вліво-Вправо” перейти від відносних одиниць вимірювання коефіцієнту прозорості (abs) до відсоткових одиниць (T,%) і натиснути кнопку “Enter”.

8. Для того, щоб вибрати діапазон вимірювання по осі ординат, слід за допомогою кнопок зі стрілками “Вниз-Вверх-Вліво-Вправо” встановити мінімальне та максимальне значення вимірюваної прозорості, натискаючи або кнопку “Enter” у разі згоди із автоматично запропонованим діапазоном, або встановити його в ручному режимі за допомогою кнопок з цифрами, що розташовані на передній панелі управління, та кнопки “Enter”.

9. В кювету приладу розміщують дослідний зразок на проти першого вікна.

10. Для початку сканування спектру прозорості зразку треба натиснути кнопку “Start” на передній панелі управління. Процес сканування триває декілька хвилин, про завершення операції свідчить звуковий сигнал та припинення перебігу довжин хвиль у правому верхньому куті робочого дисплею.

11. Коли спектр прозорості зразку відобразиться на робочому дисплеї повністю, слід провести вимірювання цієї кривої в ручному режимі по точках. Для цього на передній панелі управління потрібно спочатку настигнути кнопку “F3”, а далі за допомогою кнопок зі стрілками “Вліво-Вправо” пройти вздовж графіку. При цьому значення довжини хвилі та відповідної прозорості зразку відображаються у правому верхньому куті робочого дисплею. Крок ручного сканування обирається самостійно з таких міркувань: на лінійній ділянці спектру можна проводити вимірювання з великим кроком (20-50 нм), а в нелінійних областях з меншим кроком (5-10 нм).

12. Після завершення вимірювань даного зразку, слід очистити робочий дисплей від спектру, натиснувши кнопку “Clear” на передній панелі управління.

13. Відкрити кювету приладу і вийняти звідти зразок.

14. Помістити напроти першого вікна у кюветі наступний дослідний зразок і провести для нього аналогічні вимірювання (пункт 8-11).

Обробка результатів

1. Побудувати спектри прозорості різних зразків на одному рисунку.
2. Визначити з графіків величини прозорості всіх зразків в трьох діапазонах – ультрафіолетовому (350 нм), в видимому (550 нм) та в інфрачервоному (850 нм). Дані по прозорості занести у табл. 1.
3. Розрахувати величину оптичної густини кожного зразку за формулою (2). Дані розрахунків занести у табл.2. Крок розрахунку обрати самостійно, однак повинно бути не менше 10 значень. У табл. 2 поряд з кожним значенням довжини хвилі вказати розраховане за формулами (3-4) значення енергії кванта світла в еВ.
4. Побудувати графік спектрального розподілу оптичної густини досліджуваних зразків.

5. За величиною прозорості та оптичної густини зробити висновок про матеріал плівок, нанесених на скляні підкладки.
6. Для двошарових плівок вказати на наявність ефекту просвітлення на основі експериментально виміряного спектру прозорості та теоретично на основі формули (6). Розрахувати оптимальну товщину антивідбивального покриття для довжини хвилі випромінювання 600 нм за формулою (7).

Контрольні запитання

1. Перелічіть прозорі матеріали, які використовуються в електроніці. Назвіть прилади, в яких вони можуть застосовуватись.
2. Що показує коефіцієнт прозорості і як він визначається?
3. Що таке оптична густина матеріалу? Як вона визначається?
4. Записати умову прозорості речовини. Що таке гранична довжина хвилі випромінювання?
5. Яким чином зі спектрів пропускання можна оцінити ширину забороненої зони матеріалу?
6. В чому полягає ефект просвітлення оптики? Якою є умова для його спостереження?
7. Яким чином здійснюється підбір товщини антивідбивального покриття для даного матеріалу?

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Оптоелектроніка: навч. посіб. для студентів ВНЗ, які навчаються за напрямом підгот. "Оптотехніка". Ч. 1. Фізичні основи / Е. І. Черняков, Ю. П. Мачехін, М. П. Кухтін, ХНУРЕ, 2015. – 396 с.
2. Сонячна енергетика: теорія та практика: монографія / Й.С. Мисак, Національний університет "Львівська політехніка" - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2014. – 339 с.
3. Кривець, О.С. Квантова електроніка: навчальний посібник / О.С. Кривець, О.О. Шматько, О.В. Ющенко. - Суми : СумДУ, 2013. – 340 с.
4. Макаренко О.В. Прикладна оптика. Спектральні прилади та методи спектральних вимірювань – Київ: Пульсари, 2013. – 256 с.
5. Чадюк, В.О. Оптоелектроніка: від макро до нано. Генерація оптичного випромінювання: навчальний посібник для студентів ВНЗ, які навчаються за напрямом підготовки "Електронні пристрої та системи" / В.О. Чадюк, НТУУ "КПІ", Київ. – 2012. – 378 с.
6. Галат, О.Б. Оптоелектроніка: навч. посіб. для студ. вищих навч. закл., Які навч. за напрямом підготовки "Електронні пристрої та системи" / О.Б. Галат, Ю.О. Гордієнко, М.Г. Стражинський. – Харків: Компанія СМІТ, 2010. – 196 с.
7. Шуберт Ф.Е. Светодиоды. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.
8. Гременок В.Ф. Солнечные элементы на основе полупроводниковых материалов / Гременок В. Ф., Тиванов М. С., Залесский В. Б. – Минск: Изд. Центр БГУ, 2007. – 222 с.
9. Мухин Ю. А. Приборы и устройства полупроводниковой оптоэлектроники. – М.: Изд-во МЭИ, 1996. – 298 с.
10. Сердюк В. В. Физика солнечных элементов. – Одесса: Логос, 1994. – 336 с.

11. Верещагин И. К., Косяченко Л. А., Кокин С. М. Введение в оптоэлектронику. – М.: Высшая школа, 1991. – 191 с.
12. Войцеховский А. В., Давыдов В. Н. Фотоэлектрические МДП-структуры из узкозонных полупроводников. – Томск: Радио и связь, 1990. – 328 с.
13. Ковтонюк Н.Ф., Сальников Е.Н. Фоточувствительные МДП-приборы для преобразования изображений – М.: Радио и связь, 1990. – 160 с.
14. Павлова В.Т. Оптика тонких пленок и технология их нанесения – Минск: БПИ, 1990. – 83 с.
15. Сыновров В.Ф., Чистов Ю.С. Физика МДП-структур. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1989. – 224 с.
16. Носов Ю. Р. Оптоэлектроника. – М.: Радио и связь, 1989. – 359 с.
17. Фаренбрух А. Солнечные элементы. Теория и эксперимент. / А. Фаренбрух Р. Бьюб, пер. с ан. М: Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.
18. Сокольников А. В., Тюрин Е. Г. МДП-структуры. – Саранск: Изд. Мордов. ун-та, 1986. – 64 с.
19. Чопра К., Дас С. Тонкопленочные солнечные элементы – М.: Мир, 1986. – 435 с.
20. Комраков Б.М., Шапочкин Б.А. Измерение параметров оптических покрытий – М.: Машиностроение, 1986. – 136 с.
21. Л. С. Шарупич, Н. М. Тугов. Оптоэлектроника. М.: Энергоатомиздат. 1984. – 329 с.
22. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. Кн.1. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
23. Колтун М.М. Оптика и метрология солнечных элементов / М.М. Колтун. – М.: Наука, 1984. – 280 с.
24. Гурский Л. И., Румак Н. В., Куксо В. В. Зарядовые свойства МОП-структур. – Минск: Наука и техника, 1980. – 200 с.